



FACULTADE DE BIOLOXÍA

Departamento de Edafoloxía  
e Química Agrícola

# RELACIONES SUELO - PLANTA EN ECOSISTEMAS DE BREZALES ATLÁNTICOS DE GALICIA

TESIS DOCTORAL

EVA BUJÁN GARCÍA





FACULTADE DE BIOLOXÍA

Departamento de Edafoloxía  
e Química Agrícola

**RELACIONES SUELO – PLANTA  
EN ECOSISTEMAS DE BREZALES  
ATLÁNTICOS DE GALICIA**

**FDO. EVA BUJÁN GARCÍA**

**SANTIAGO DE COMPOSTELA, SEPTIEMBRE 2009**









FACULTADE DE BIOLOXÍA

Departamento de Edafoloxía  
e Química Agrícola

D. Felipe Macías Vázquez, Catedrático de Edafología y Química Agrícola de la Facultad de Biología y D<sup>a</sup> Ana M<sup>a</sup> García Arrese, P.A.S. colaboradora del Instituto de Investigaciones Tecnológicas, de la Universidad de Santiago de Compostela,

CERTIFICAN:

Que la presente Memoria titulada “RELACIONES SUELO-PLANTA EN ECOSISTEMAS DE BREZALES ATLÁNTICOS DE GALICIA”, que para optar al grado de Doctora en Ciencias Biológicas presenta D<sup>a</sup> EVA BUJÁN GARCÍA, ha sido realizada bajo nuestra dirección en el Departamento de Edafología y Química Agrícola de la Facultad de Biología, de la Universidad de Santiago de Compostela.

Considerando que representa trabajo de Tesis, se autoriza su presentación ante la Comisión de Doctorado de la Universidad de Santiago de Compostela.

Y para que conste, se expide el siguiente certificado.

Santiago de Compostela, a 21 de septiembre de 2009

Fdo.: Dra. D<sup>a</sup> Ana M<sup>a</sup> García Arrese

Fdo.: Dr. D. Felipe Macías Vázquez









*“Dejamos de temer aquello que se ha aprendido a entender”.*

MARIE CURIE

*“La ignorancia afirma o niega rotundamente, la Ciencia duda”.*

VOLTAIRE

*“¡Nos ladran Sancho!, señal que avanzamos”.*

CERVANTES (de *El Quijote*)

## AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Educación y Ciencia por la concesión de una Beca de Postgrado de Formación de Profesorado Universitario a la autora de esta Tesis Doctoral



*Ami Familia*

Autora	Eva Buján García
Título	Relaciones suelo – planta en ecosistemas de brezales atlánticos de Galicia
Año	2009
Descripción	1 vol. + CD (con la edición en pdf)
Notas	Tesis doctoral
Notas	Universidade de Santiago de Compostela Facultade de Bioloxía Departamento de Edafoloxía e Química Agrícola

© de la tesis: Eva Buján García

© de los dibujos de las portadillas: Xosé Lomba

Nota:

Se ceden los derechos de publicación a Universidade de Santiago de Compostela, previa comunicación expresa a la autora de dicha tesis.



## RESUMEN

Esta Memoria aborda las relaciones suelo-planta en ecosistemas de brezales atlánticos de Galicia. Se articula atendiendo a tres escalas de trabajo que suponen un grado creciente de detalle. La mayor escala corresponde al estudio de los hábitats como parte fundamental del ecosistema matorral. Sigue la caracterización de los suelos y las plantas presentes en brezales de Galicia. La escala menor de trabajo considerada comprende el estudio de los fitolitos, un tipo de mineralización que producen las plantas en general, y los brezos en particular.

Galicia cuenta con 12 especies de brezos: 10 del género *Erica* (*Erica cinerea* L., *E. ciliaris* Loefl. ex L., *E. tetralix* L., *E. mackaiana* Bab. In J. Mackay., *E. erigena* R. Ross., *E. scoparia* L., y *E. umbellata* Loefl. ex L., *E. vagans* L., *E. australis* L., *E. arborea* L.), y dos monoespecíficas: la brechina: *Calluna vulgaris* (L.) Hull y *Daboecia cantabrica* (Huds.) K. Koch. En la Introducción se estudian éstas especies y su biogeografía, se hace una revisión de la historia ecológica de los brezales y sus sistemas de gestión y aprovechamientos. Se describen el ecosistema matorral y su valor de conservación.

Para establecer las características de los hábitats que ocupan los brezos, el estudio se centra en los factores de formación de suelo (sobre todo material de partida y relieve) como elemento consustancial al hábitat de la vegetación terrestre y porque determina la disponibilidad de recursos fundamentales para las plantas: sustrato, agua y nutrientes. Se ha empleado la información contenida en los inventarios florísticos relativa a la abundancia de las especies y a la topografía (pendiente, orientación, altitud). Estos datos se han completado con la información sobre la litología de los lugares en los que se realizaron los inventarios. Los brezos muestran diferencias muy marcadas en lo que se refiere a los tipos de hábitats que colonizan (p. ej. en los principales factores edáficos que limitan su desarrollo). Los hábitats que albergan las doce especies de brezos gallegos se han caracterizado sucesivamente por las condiciones de litología (fertilidad), reserva de agua edáfica, clima y profundidad del sustrato.

Para caracterizar los suelos y las especies de brezo de Galicia se seleccionaron parcelas ocupadas por formaciones de matorral que mostraban un claro predominio de los brezos sobre los tojos. Entre los años 2003 y 2007 se muestrean 34 brezales de las provincias de La Coruña y Lugo, recogiendo las plantas junto con el suelo que rodea su sistema radicular. Se separan la rizosfera, el cepellón y las muestras de vegetación (flores, hojas, tallos y raíces).

Las propiedades químicas de los suelos de brezal muestran una gran heterogeneidad en función del material de partida, habiéndose identificado los principales factores que subyacen a dicha variabilidad: reactividad del suelo, mineralogía, contenido de materia orgánica y química del Al. La influencia del material de partida del suelo sobre las propiedades químicas de los suelos y sobre la composición elemental de los brezos ha resultado ser más importante que la influencia del factor especie. De hecho, las especies cuya distribución en Galicia se limita a tipos de suelos muy particulares, o plantas más generalistas creciendo en determinadas litologías, actúan como indicadores del ambiente geoquímico en el que viven. Entre los resultados más interesantes cabe destacar las elevadas correlaciones entre los

contenidos totales de N, P, Mg, Al, Fe, Mn, Cu Ni y Cr en suelo y planta, y la relación más débil con los nutrientes en formas asimilables (P) o cambiables (Mg). Este hecho induce a pensar en la importante función que tienen las micorrizas ericoides en la transferencia de elementos desde el suelo hacia la planta.

Finalmente se determina la cantidad de fitolitos en las especies de brezos presentes en Galicia y la composición elemental de los fitolitos foliares de *C. vulgaris* en relación con la geoquímica del suelo. Se han encontrado diferencias en la producción de fitolitos según el órgano vegetal, la especie y el tipo de suelo, de manera que estos dos últimos factores son los que condicionan la cantidad y el órgano preferente de acumulación. *Calluna vulgaris* destaca por ser la especie que más fitolitos foliares produce en comparación con los otros brezos presentes en su mismo hábitat y todas las especies que viven en suelos encharcados concentran mayoritariamente los fitolitos en la raíz (excepto *Calluna vulgaris*). Existen especies de brezos (*Erica cinerea*, *Daboecia cantabrica* y *Erica umbellata*) en los que el órgano de mayor acumulación varía en función del suelo.

La composición química de los fitolitos foliares de *C. vulgaris* refleja la variedad de ambientes geoquímicos en los que vive la planta. En todos los suelos el Al y el Fe son los elementos de la hoja que en mayor proporción son inmovilizados en los fitolitos. También destacan los elevados porcentajes del Cu y en menor medida de Cr, Pb y Zn, en función del suelo, de manera que a medida que aumentan los contenidos de metales en el suelo, estos incrementan su concentración en el fitolitos. El hecho de que los elementos que son inmovilizados en mayores proporciones puedan resultar tóxicos para la planta, confirmaría el papel de los fitolitos como sumidero biogeoquímico, incrementando la resistencia frente al estrés metálico en *C. vulgaris*.

## SUMMARY

This PhD report addresses soil-plant relationships in Atlantic heathland ecosystems of Galicia (NW, Spain). It articulates the basis of three levels of work involving an increasing degree of detail. The larger scale involves the study of habitats as a fundamental part of the scrub ecosystem. It follows the characterization of soils and plants of Galician heathlands. The smaller scale of work considered includes the study of phytoliths, a type of mineralization produced by plants in general and in particular by heather.

Galicia has 12 species of heather: 10 of the genus *Erica* (*Erica cinerea* L., *E. ciliaris* Loefl. ex L., *E. tetralix* L., *E. mackaiana* Bab. In J. Mackay., *E. erigena* R. Ross., *E. scoparia* L. y *E. umbellata* Loefl. ex L., *E. vagans* L., *E. australis* L., *E. arborea* L.), and two single-species: *Calluna vulgaris* (L.) Hull and *Daboecia cantabrica* (Huds.) K. Koch. The Introduction is a review of the ecological history of the heathlands and their management systems and land use. It describes the scrub ecosystem and its conservation value, and discusses the biogeography heathers in Galicia.

To establish the characteristics of habitats occupied by heaths of Galicia, the study focuses on factors of soil formation (mainly parent material and relieve) as an element inherent to the habitat of terrestrial vegetation and because it determines the availability of resources essential for plants: substrate, water and nutrients. Information on floristic inventories of the abundance of species and topography (slope, orientation, elevation) has also been used. These data are supplemented with information on the lithology of the places where inventories were carried out. Heather shows marked differences in regard to the type of habitat it colonizes (i.e. major soil factors that limit their development). The habitats that are home to twelve species of heather Galician have been characterized successively by the conditions of lithology (fertility), soil water availability, climate and depth of the substrate.

To characterize soil and heather species were selected plots occupied by scrub formations that showed a clear predominance of heather over gorse. Between 2003 and 2007 34 heaths of the provinces of La Coruna and Lugo were sampled, collecting plants and bulk and rhizospheric soil. Different plant parts (flowers, leaves, stems and roots) were also sampled. The chemical properties of heathland soils show great heterogeneity in terms of the parent material, having identified the key factors underlying this variability. The elemental composition of the plant is related to the soil composition, which is ultimately dependent on the nature (mineralogy, elemental composition, etc.) of the parent material. In fact, those species whose distribution in Galicia is limited to very specific types of soil, or plants growing in certain general lithologies, act as indicators of the geochemical environment in which they live. Among the most interesting results include the high correlations between total contents of N, P, Mg, Al, Fe, Mn, Cu, Ni and Cr in soil and plant, and the weaker relationship with bioavailable (P) or exchangeables (Mg) nutrients. This fact suggests the important role that mycorrhizae ericoides in the transfer of elements from soil to plant.

Finally the amount of phytoliths in heath species in Galicia was determined as well as elemental composition of leaf phytoliths from *C. vulgaris* in relation to soil geochemistry. We found differences in the production of phytoliths according to the vegetal organ, plant species and soil type, being these last



two factors what determine the amount and preferential organ of accumulation. *Calluna vulgaris* stands out as the specie that produces more leaf phytoliths compared to other heaths present in the same habitats. All species living in waterlogged soils concentrated phytoliths mainly in the root (except *Calluna vulgaris*). In some species of heather (*Erica cinerea*, *Erica umbellata* and *Daboecia cantabrica*) the organ of greatest accumulation of phytoliths varies with soil type.

The chemical composition of leaf phytoliths from *C. vulgaris* reflects the variety of geochemical environments in which the plant lives. In all soils Al and Fe are the elements immobilized in phytoliths in the greater proportions. They also emphasize the high percentages of Cu and to a lesser extent Cr, Pb and Zn present in soil, so that the greater metal content in soil, the greater concentration in the phytoliths. The fact that the elements are immobilized on phytoliths in larger quantities can be toxic to the plant, confirmed the role of phytoliths as biogeochemical sink, increasing the resistance to metal stress in *C. vulgaris*.



## ÍNDICE



## ÍNDICE

<b>JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>21</b>
I.1. Los brezos de Galicia .....	24
I.2. Historia ecológica de los brezales. Sistemas de gestión y aprovechamientos .....	28
I.3. Valor de conservación .....	37
I.4. El ecosistema matorral .....	40
I.5. Valor paisajístico .....	46
<b>II. MATERIAL Y MÉTODOS .....</b>	<b>49</b>
II.1. Estudio de los hábitats de los brezos de Galicia .....	51
II.2. Estudio de los suelos y la vegetación .....	54
II.2.1. Geología .....	56
II.2.2. Clima .....	71
II.2.3. Vegetación potencial .....	73
II.2.4. Tratamiento de muestras .....	75
II.2.5. Codificación de las muestras .....	75
II.2.6. Métodos de análisis de suelos .....	76
II.2.7. Métodos de análisis de plantas .....	77
– Análisis de los fitolitos .....	78
II.2.8. Métodos de análisis estadístico .....	81
<b>III. HÁBITATS .....</b>	<b>83</b>
III.1. Introducción .....	85
III.2. Resultados y discusión .....	88
III.2.1. Frecuencia de especies .....	88
III.2.2. Clima .....	88
III.2.3. Litología .....	90
III.2.4. Altitud .....	91
III.2.5. Orientación .....	92
III.2.6. Pendiente .....	93
III.2.7. Disponibilidad de nutrientes .....	94
III.2.8. Disponibilidad de agua edáfica .....	95
III.2.9. Interacción de factores .....	95
III.2.10. Las áreas de ecotono .....	103



III.3. Conclusiones del capítulo .....	107
Conclusions du chapitre .....	109
<b>IV. RELACIONES SUELO – PLANTA .....</b>	<b>111</b>
IV.1. Introducción .....	113
IV.2. Propiedades de los suelos de brezal .....	116
IV.3. Resultados y discusión .....	118
IV.3.1. Reacción del suelo (actual y potencial) .....	118
IV.3.2. pH en NaF .....	120
IV.3.3. Contenido de materia orgánica .....	120
IV.3.4. Fósforo .....	124
IV.3.5. Capacidad de intercambio catiónico .....	125
IV.3.6. Análisis total de elementos mayoritarios .....	130
IV.3.7. Análisis total de elementos traza .....	134
IV.3.8. Análisis de componentes principales .....	141
IV.3.9. Matrices de correlación .....	148
IV.3.10. Análisis de varianza en función de la especie de brezo .....	149
IV.4. Análisis de los brezos .....	151
IV.4.1. Concentración de elementos biófilos .....	151
IV.4.2. Concentración de elementos mayoritarios .....	153
IV.4.3. Concentración de elementos traza .....	156
IV.4.4. Matrices de correlación en planta .....	161
IV.4.5. Análisis elemental por material de partida de suelo .....	165
IV.5. Relaciones suelo – planta .....	167
IV.5.1. Matrices de correlación suelo – planta .....	167
IV.5.2. Coeficientes de transferencia suelo – planta .....	168
IV.6. Conclusiones del capítulo .....	171
Conclusions du chapitre .....	173
<b>V. FITOLITOS .....</b>	<b>175</b>
V.1. Introducción .....	177
V.2. Resultados y discusión .....	179
V.2.1. Contenido de cenizas y fitolitos .....	179
V.2.2. Relación entre cenizas y fitolitos .....	180
V.2.3. Producción de fitolitos para cada especie de brezo en cada suelo .....	183
V.2.4. Producción de fitolitos por especie .....	185
V.2.5. Producción de fitolitos por material de partida del suelo .....	186

V.3. Identificación microscópica y análisis elemental de fitolitos en hojas de <i>C. vulgaris</i> .....	188
V.3.1. Identificación de fitolitos por microscopía electrónica de barrido .....	188
V.3.2. Composición elemental de los fitolitos.....	190
– Cantidad de fitolitos y concentración de sílice .....	196
– Concentración de Ca, Mg y K .....	199
– Concentración de Al, Fe y Mn .....	201
– Concentración de Cu y Zn .....	204
– Concentración de Ni, Cr y Pb .....	205
– Factores de concentración fitolito – hoja .....	206
– Relación con la geoquímica de los brezales .....	207
V.4. Conclusiones del capítulo .....	211
Conclusions du chapitre .....	213
<b>CONCLUSIONES GENERALES</b> .....	<b>215</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>221</b>





## **JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS**



## JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

La Directiva Hábitats<sup>1</sup> (97/62/CE) es la base en la que se asienta la política actual europea de protección de la biodiversidad de flora y fauna. En cumplimiento de esta Directiva todos los estados miembros están obligados a designar los denominados “*Lugares de Importancia Comunitaria*” (LIC), que conformarán la Red Natura 2000, de ámbito continental. En tanto no se estableció definitivamente la Red Natura Europea estos LIC, se declararon como “*espacios en régimen de protección general*”, de acuerdo con el artículo 6 del Decreto 82/1989 de 11 de mayo. Una vez traspuesta la Directiva Hábitat al derecho interno español mediante el Real Decreto 1997/1995 de 7 de diciembre, el Consello de la Xunta acordó mediante la Orden de 7 de junio de 2001 (DOG núm. 118, de 19 de julio de 2001) aprobar la revisión de la propuesta de los LIC, ampliando las figuras de protección existentes hasta ese momento. Propuso una superficie total de 369.154 ha, asumiendo su conservación y sostenibilidad, así como el mantenimiento de su biodiversidad y características propias.

El Decreto 72/2004, de 2 de abril de la Xunta de Galicia (DOG núm. 69, de 12 de abril) declara como Zonas de Especial Protección de los Valores Naturales las zonas anteriormente propuestas como ZEPAS y LIC, aumentando hasta las 383.222 Ha la superficie total protegida en Galicia. Poco después, la Resolución do 30 de abril de 2004 (DOG núm. 95, de 19 de mayo) recoge los límites cartográficos de dichos espacios.

En Galicia, una gran extensión de los LIC pertenecen a comunidades de brezales atlánticos. Estas formaciones se incluyen con distinto valor de conservación en los anexos de la Directiva Hábitats y así los brezales gallegos se clasifican como Hábitats de interés comunitario (4030 Brezales secos europeos) y Hábitats prioritarios (4020 Brezales húmedos atlánticos templados con *Erica ciliaris* y *Erica tetralix*; y 4040 Brezales costeros atlánticos secos con *Erica vagans*). Algunos también se incluyen en otros Hábitats prioritarios como son las turberas, aunque en este caso, el factor ambiental que define la existencia del hábitat es la presencia de turba, independientemente de la composición vegetal que sustente.

Estas comunidades han visto su superficie reducida en Europa desde el siglo XVIII debido a la transformación agraria realizada mediante encalado y fertilización, condiciones que hacen inviable el crecimiento de la mayor parte de las especies de brezos y diversos autores han señalado como una de las causas de desaparición de los brezales europeos el abandono de los usos tradicionales (Gimingham, 1981; Webb, 1998; Parry, 2003; Symens & Day, 2003). A pesar de su práctica desaparición en gran parte de Europa (Gimingham *et al.*, 1979; Rose *et al.*, 2000) estas formaciones ocupan extensiones muy importantes en el Noroeste de la Península Ibérica (Koldo *et al.* 1998).

---

**Directiva 97/62/CE**<sup>1</sup> del Consejo de 27 de octubre de 1997 por la que se adapta al progreso científico y técnico la Directiva 92/43/CEE, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de fauna y flora silvestres (*Diario Oficial n° L 305 de 08/11/1997 P. 0042 – 0065*).

El interés principal de los brezos radica en que se trata de una vegetación singular y con un gran peso en el paisaje de gran parte del territorio de Galicia, especialmente cuando se presenta en extensiones continuas en áreas de montaña, cuando incluye especies vegetales endémicas, como es el caso de las áreas serpentínicas de las Sierras de A Capelada y el Careón, o cuando poseen un carácter hidromorfo como las asociadas a las turberas de la Serra do Xistral; en general, condicionan la cantidad y calidad de la fauna característica asociada tanto al propio ecosistema, como de los ecosistemas próximos con los que mantiene relaciones funcionales. El cromatismo de estas formaciones en las montañas gallegas posee un elevado valor paisajístico y llevó a Bellot (1966) a definir las como el paisaje “gallego por antonomasia”.

Según los datos del Tercer Inventario Forestal Nacional (1997-2006) el matorral ocupa en Galicia una superficie de al menos 634.123 Ha, confirmando su presencia por todo el territorio de la Comunidad Autónoma. Estas formaciones han estado sometidas en nuestro país en los últimos años a un proceso de transformación intensa por el abandono de los usos tradicionales, su conversión en praderas y pastizales de mayor eficiencia energética o su incorporación a la superficie forestal arbolada, generalmente con introducción de especies de crecimiento rápido y gran frugalidad, como son los pinos y eucaliptos. Además, otras actividades industriales influyen en la disminución de la superficie de los brezales, destacando, entre otras, la minería y las actividades de producción energética, las obras de transformación agraria como la concentración parcelaria, la construcción de infraestructuras viarias o industriales, etc. De manera que muchas de estas formaciones se han visto afectadas, estimándose en más de 300.000 Ha la superficie transformada en los últimos años.

Galicia cuenta con 12 especies de brezos y 4 de tojos, que se reparten el territorio ocupando distintos hábitats en función de los requerimientos particulares de sus nichos ecológicos. Esta investigación se centra en el estudio de los suelos de todos los brezos presentes en nuestra comunidad autónoma, ya que no se conoce con precisión la influencia de la litología y las propiedades edáficas, sobre la presencia y distribución de las especies de brezos. Galicia ofrece una oportunidad excepcional para realizar un estudio de estas características, debido a varios factores, entre los que destacan el poseer una diversidad de brezos de las más elevada de Europa fundamentalmente por ser frontera entre las regiones biogeográficas Eurosiberiana y Mediterránea y por el hecho de poseer una litología muy variada, primer factor que condiciona las propiedades de los suelos que sustentan dicha vegetación. Este hecho, unido a la necesidad de disponer de técnicas de recuperación adecuadas para corregir los efectos de obras o actuaciones que deban realizarse en zonas LIC, es lo que ha llevado a plantear el estudio de las relaciones suelo-planta en las comunidades de brezal existentes en Galicia, como un intento de comprender mejor las condiciones más adecuadas para el desarrollo de estas especies, con el fin de asegurar su pervivencia en las excelentes condiciones de singularidad, diversidad y vigor que exhiben en la actualidad en Galicia.



Para ello, esta Memoria de Tesis se estructura de la siguiente manera:

El Capítulo I comprende una introducción sobre las especies de brezos presentes en Galicia y su biogeografía. Se revisa la historia ecológica de los brezales, su gestión y aprovechamientos, y su valor de conservación. Se describe el ecosistema matorral y su valor paisajístico.

El Capítulo II desarrolla el material y los métodos utilizados para la elaboración de la presente Memoria.

En el Capítulo III se determinan las principales características que definen los hábitats que ocupan las doce especies de brezos en Galicia, profundizando en los requerimientos de sus nichos ecológicos particulares.

En el Capítulo IV se caracterizan los suelos de brezal y las 12 especies de brezos de Galicia. Se establecen las relaciones suelo-planta existentes.

En el Capítulo V se estudian las silicificaciones que producen estas plantas: los fitolitos. Se determina la cantidad de fitolitos en las especies de brezos presentes en Galicia, cuánto produce cada órgano en cada especie, en función de algunas de las propiedades de los suelos. Se estudia la relación entre la cantidad y la composición elemental de los fitolitos foliares de *C. vulgaris* y la geoquímica del suelo. Se plantea la hipótesis del papel de los fitolitos como incrementadores de la resistencia al estrés metálico en estas plantas.





# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**



A escala mundial se conocen unas 865 especies de brezos, pertenecientes a la subfamilia *Ericoideae*, con una **biogeografía** muy particular, pues su territorio está repartido entre dos grandes núcleos: uno en África, que cuenta con más de 840 especies; y otro en Europa, con 19 especies, de las cuales 17 pertenecientes al género *Erica*. En África el género *Erica* está asociado al matorral (*scrub*) y a las praderas del piso montano, formando la vegetación característica de las montañas del Este africano (con 22 especies). También se encuentra en las altitudes máximas de las Islas Madagascar y Mascarene (unas 50 especies) (Killick, 1979 en McGuire & Kron, 2005), pero la gran mayoría de especies están en la región suroccidental del Cabo en Sudáfrica (Oliver, 1991): confinadas al sur del Río Limpopo, forman arbustos perennifolios, con una gran concentración de endemismos de área muy limitada y en peligro de extinción (Bayer & López, 1989). En Europa, los brezos se concentran en el Oeste y en el Sur del continente, con irradiaciones hacia el centro y Norte, región mediterránea e Islas Canarias. En comparación con la diversidad de especies del género *Erica* que existen en el continente africano, el núcleo de distribución europeo está formado por un número muy bajo de especies (McGuire & Kron, 2005) y por ello, históricamente se ha pensado en un origen sudafricano (Cain, 1944 en McGuire & Kron, 2005) y en su posterior expansión a Europa. Así, Chevalier (1923) plantea que el **origen** de los brezos habría que buscarlo en una región del África tropical, que constituiría el núcleo de dispersión de los géneros de *Ericoideas*. Dicha región, hoy cubierta por sabanas y las selvas pluviales, habría tenido en épocas anteriores un clima seco y cálido, muy diferente del actual. Al cambiar éste, los brezos se habrían visto obligados a emigrar; unos se habrían refugiado en las altas montañas del Este de África y la mayoría, se vieron desplazados hacia las zonas de clima mediterráneo de la región del Cabo; finalmente, algunas especies habrían podido emigrar hacia el Norte, unas pocas al Este, llegando hasta Asia menor y las otras por el Oeste, encontrando un refugio adecuado en el Occidente europeo e Islas Canarias. Según esto, los brezos europeos serían la avanzadilla septentrional de estas ericáceas tropicales, lo que concuerda con el hecho de que el mayor número de especies de *Erica* en Europa se encuentre precisamente en la Península Ibérica, paso obligado en la migración occidental de África a Europa (Bayer & López, 1989).

Sin embargo, las investigaciones más recientes contradicen esta hipótesis basándose en el hecho de que las especies europeas muestran rasgos geográficos relativamente amplios aún con una baja diversidad, frente al núcleo africano donde los taxones del Cabo colonizan un espacio muy restringido con un número de especies extraordinariamente elevado. Esta distribución inusual ha suscitado cuestiones acerca de las relaciones evolutivas de las especies de *Erica* y parece que la filogenia de varias especies de brezos, entre ellas seis de las distribuidas por Galicia, indica que los taxones africanos podrían ser descendientes de un antecesor europeo común (McGuire & Kron, 2005).

## I.1. LOS BREZOS DE GALICIA

Los **brezos de Galicia** son especies vegetales de porte arbustivo en su mayoría, pertenecientes a los géneros *Calluna*, *Daboecia* y *Erica* (Tabla I.1) de la familia *Ericaceae* que, junto a los tojos (*Ulex spp.*) y otras leguminosas arbustivas, forman parte del ecosistema genéricamente denominado “matorral”. Las formaciones de matorral características, ampliamente extendidas en la actualidad por toda Galicia han sido descritas por Dalda (1972) bajo diferentes ópticas y así, desde el punto de vista fisonómico, las define como tojales con brezo, debido a la mayor cobertura de la leguminosa; desde el punto de vista florístico son brezales pues habitualmente se componen de más especies de brezos que de tojos. Ecológicamente la formación se integra en la extensa área boreal de los brezos, en la que al territorio gallego le corresponde un grado que Dalda considera como el de los brezales europeos de transición, intermedio entre los brezales nórdicos (que se componen de *Calluna vulgaris* y *Erica tetralix* como especies principales) y el brezal mediterráneo (con la aparición de *Erica scoparia* y *Erica arborea*).

Tabla I.1. Especies de brezos presentes en Galicia

<i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull	<i>Erica cinerea</i> L.	<i>Erica ciliaris</i> Loeffl. ex L.
<i>Erica umbellata</i> Loeffl. ex L.	<i>Erica tetralix</i> L.	<i>Erica australis</i> L.
<i>Daboecia cantabrica</i> (Huds.) K. Koch	<i>Erica erigena</i> R. Ross	<i>Erica vagans</i> L.
<i>Erica mackaiana</i> Bab. in J. Mackay	<i>Erica scoparia</i> L.	<i>Erica arborea</i> L.

El número de especies de brezos de Galicia resulta elevado en comparación con la situación general descrita en otros países europeos. Debido a su localización geográfica, Galicia ocupa una posición intermedia entre dos mundos ecológicos y florísticos: las regiones Eurosiberiana y Mediterránea del reino floral Holártico (Figura 12). Este carácter de límite o paso entre dos mundos botánicos distintos hacen que Galicia sea el país de las mezclas y es precisamente el carácter de mezcla, el fundamental de la flora y vegetación de Galicia (Bellot, 1966). A título comparativo, la Península Ibérica y en general, la región Mediterránea occidental, cuenta con nueve especies de brezos más hasta un total de 21, lo que refleja el amplio rango de condiciones ecológicas que experimentan los brezales ibéricos, que cuentan con la mayor diversidad de todos los brezales Euro-Mediterráneos (Ojeda *et al.*, 1998) y por extensión, de Europa.



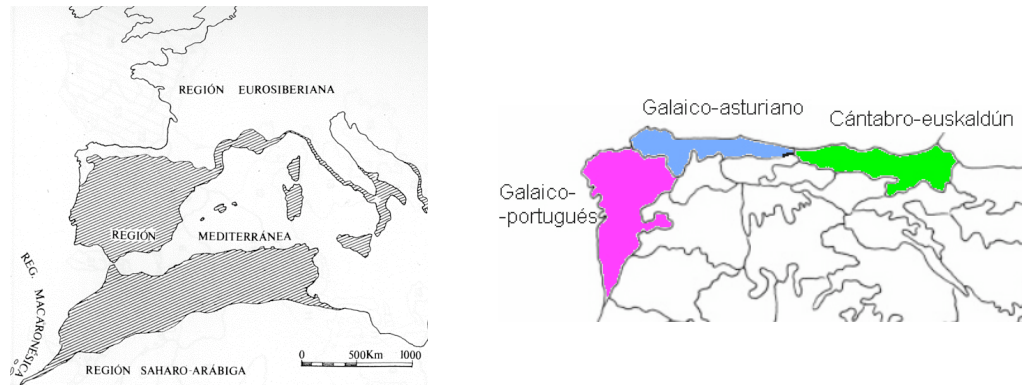


Figura I.1. Situación de Galicia entre las regiones Eurosiberiana y Mediterránea (Izquierda; tomado de Rivas-Martínez, 1987) y sectorización de la Provincia Cántabro-Atlántica (Derecha; tomado de [www.unex.es](http://www.unex.es)).

Los mapas de distribución incluidos por Fraga Vila (1982) en su Tesis Doctoral sobre los géneros *Erica* y *Calluna* presentes en Galicia, indican que los taxones principales existentes en los territorios que bordean el Atlántico Norte son *C. vulgaris*, *E. cinerea* y *E. tetralix*, enumerados en orden decreciente de superficie de sus respectivas áreas de distribución en Europa (Figura I.2). El solapamiento de dichas áreas de distribución permite apreciar que el área de confluencia de las tres especies se sitúa dentro del dominio atlántico templado y viene definida por el límite meridional de *E. cinerea* y el septentrional de *E. tetralix*.

En lo que respecta a la composición de especies y en comparación con las formaciones más septentrionales, el matorral gallego se caracteriza por una menor frecuencia de los musgos y la gran abundancia de los tojos. Junto a estas especies comunes en las regiones del Atlántico Norte, en Galicia se pueden encontrar otras con una distribución eminentemente mediterránea (*E. arborea*) o mediterránea occidental (*E. scoparia*) (Figura I.3). *E. ciliaris* es un brezo de distribución eminentemente atlántica (Ojeda *et al.*, 1998), pero presenta un área de distribución europea más reducida que los anteriores, al igual que las especies que bordean el arco Cantábrico (*D. cantabrica*, *E. mackaiana* y *E. vagans*) (Figura I.4) y otras especies con distribución limitada prácticamente a la Península Ibérica (*E. erigena*), preferentemente en su extremo occidental: *E. umbellata* y *E. australis* (Figura I.5).

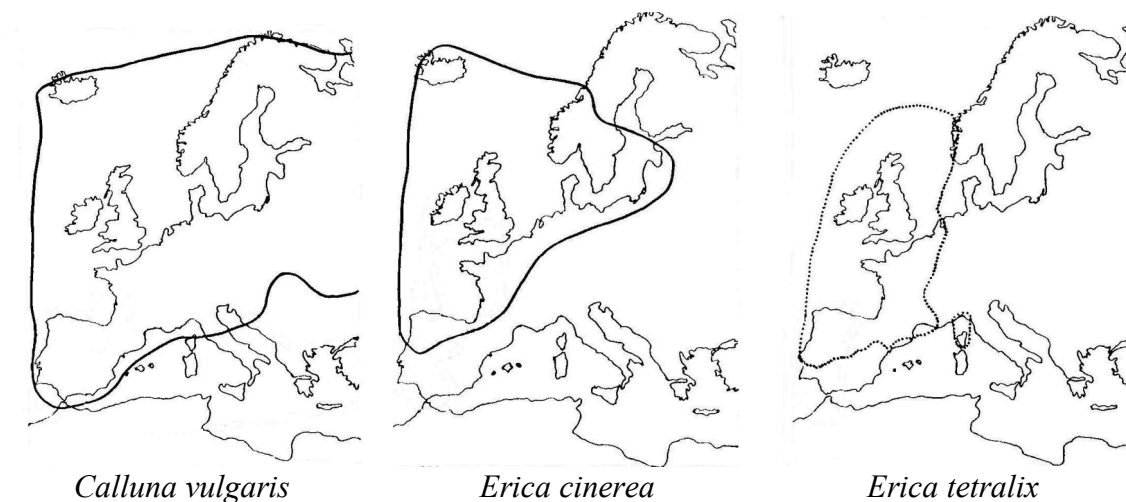


Figura I.2. Distribución de los brezos más comunes en los países ribereños del Atlántico Norte. Tomado de Fraga Vila (1982).

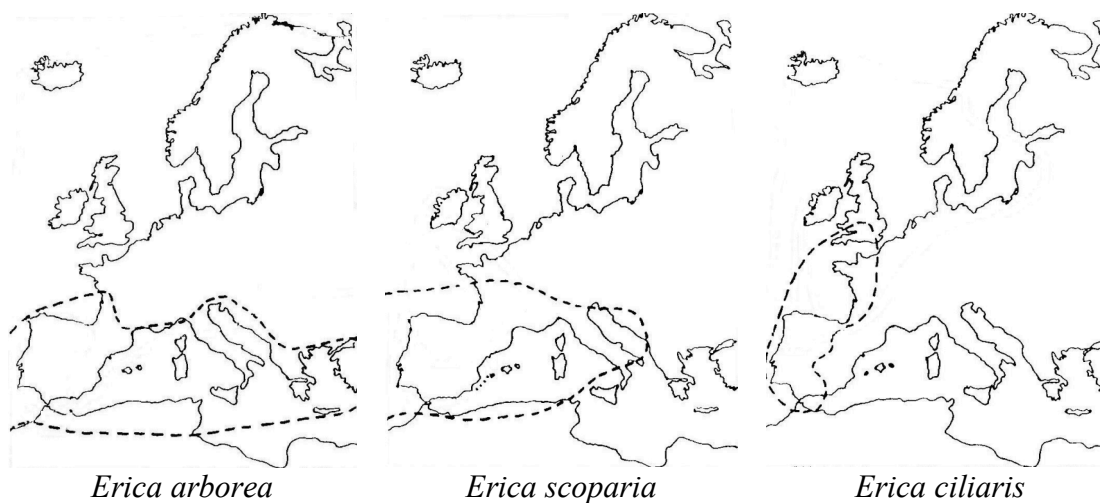


Figura I.3. Distribución de los brezos más mediterráneos (*E. arborea*, *E. scoparia*) y de *E. ciliaris*. Tomado de Fraga Vila (1982).

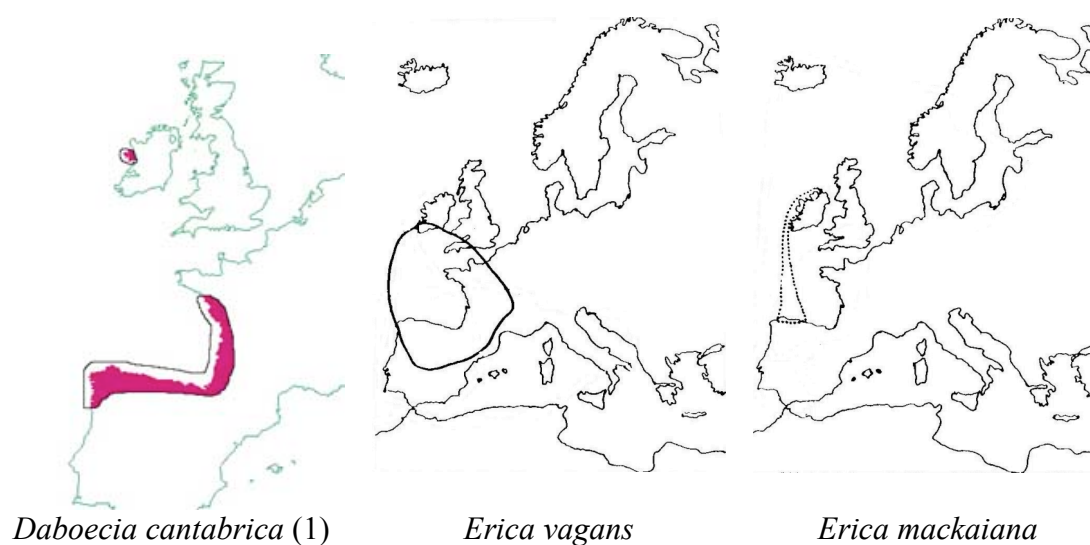


Figura I.4. Áreas de distribución de brezos que bordean el arco cantábrico. Tomado de Fraga Vila (1982).

(1) Tomado de: [www.users.zetnet.co.uk/heather](http://www.users.zetnet.co.uk/heather)

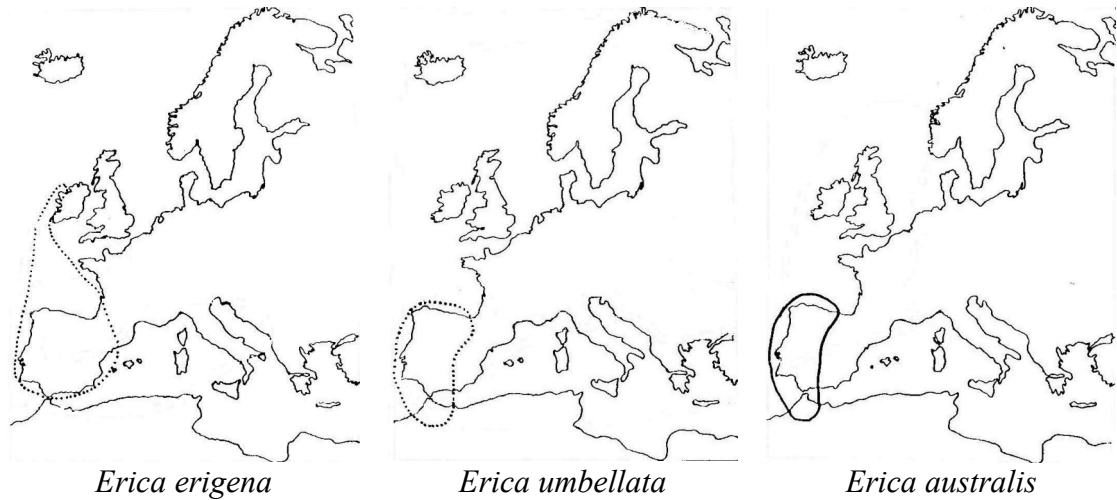


Figura 1.5. Áreas de distribución de brezos limitadas prácticamente a la Península Ibérica. Tomado de Fraga Vila (1982).

En su estudio sobre la biogeografía de los brezos en la cuenca Mediterránea, Ojeda *et al.* (1998) determinan siete elementos florísticos (Figura 1.6). La primera dicotomía separa las especies más mediterráneas (*E. arborea* y *E. scoparia*) de las restantes, que muestran una división más gradual entre las más ubicuistas (*C. vulgaris* y *E. cinerea*) de *E. australis*, que comparte grupo con *E. andevalensis* y *E. lusitanica* (ausentes en Galicia) y *E. umbellata*. *E. erigena* y *E. tetralix* que forman elementos monoespecíficos, el primero restringido al SW de Europa y el segundo extendiéndose por el Norte. Las especies más atlánticas: *E. ciliaris*, *E. mackaiana* y *E. vagans* aparecen formando otro grupo.

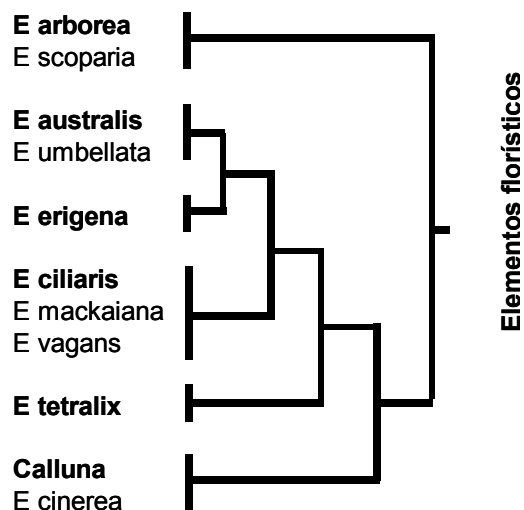


Figura 1.6. Elementos florísticos y especies relacionadas, presentes en Galicia. Tomado de Ojeda *et al.* (1998).

## I.2. HISTORIA ECOLÓGICA DE LOS BREZALES. SISTEMA DE GESTIÓN Y APROVECHAMIENTOS

A lo largo del Cenozoico la evolución de la configuración del paisaje gallego viene determinada por las oscilaciones climáticas (ciclos glaciares-interglaciares) que tuvieron lugar en nuestro planeta a partir del Neogeno (Mioceno y Plioceno) y que causaron la extinción de la mayor parte de la flora Terciaria (tropical y subtropical) previamente existente. Así, se calcula que durante los glaciares del Pleistoceno el 90% de la antigua flora Cenozoica se extinguió en el centro de Europa (Ramil *et al.*, 2001). El Cuaternario se corresponde con el período de desarrollo y expansión de los ecosistemas actuales, caracterizados por el dominio de angiospermas y mamíferos. Durante los primeros episodios fríos se produce una disminución del estrato arbóreo y un aumento de las ericáceas (Jato & Rodríguez, 1986), así los brezos estarían presentes en nuestro país desde el Terciario (Izco *et al.*, 1999; 2006). Durante el Prewürm (120-80 Ka BP) las sierras sublitorales del Norte estarían formadas por bosques mixtos y en ambientes más limitantes, brezales y herbazales, dominados por *Erica*, *Calluna* y *Gramineae*. Los primeros registros polínicos de Galicia pertenecen al Würm Medio (60-25 Ka BP) y es a partir del Tardiglacial (18/15 – 10 Ka BP) y sobretodo, una vez superada la primera gran deglaciación (13-11 Ka BP), cuando los registros reflejan una expansión de los bosques y matorrales en el litoral y sublitoral gallegos (Ramil *et al.*, 2001).

Desde el Holoceno (10 Ka BP) el paisaje gallego adquiere su configuración moderna, siendo en torno al 8.5 Ka BP cuando la vegetación arbórea alcanza su máxima expansión, permaneciendo solo deforestados tramos costeros y zonas de cumbres, dominados por matorrales y pastizales. A partir de entonces se produce la expansión de los brezales, siendo mayoritariamente los géneros *Erica* y *Calluna* los que invaden la estepa herbácea. Durante el óptimo climático del Holoceno (7-2.5 Ka BP) se mantiene la hegemonía de los bosques, estando las montañas meridionales formadas por un mosaico de matorrales y bosques mixtos (Ramil *et al.*, 2001). Es precisamente, en ese momento, cuando el hombre comienza a alterar de forma significativa la distribución y composición del paisaje mediante las prácticas agrícolas (Devezé, 1965). En la destrucción histórica del bosque en Galicia, Guitián Rivera (2001) hace una revisión bibliográfica de su evolución desde la aparición de la agricultura hasta nuestros días. Así, durante el Paleolítico y el Mesolítico apenas se nota la influencia humana en el paisaje, siendo a partir del Neolítico con la aparición de la agricultura, cuando los procesos de deforestación se generalizaron en toda la Península, produciéndose la gran expansión de los matorrales dominados por brezales. Concretamente, en Galicia se detectan los primeros indicios de cultivos hace unos 5500 años, aunque la influencia humana en el paisaje puede reconocerse en los análisis polínicos al menos desde el milenio anterior a través de la presencia de incendios recurrentes atribuidos a prácticas ganaderas (Pérez Alberti & Ramil 1996; Guitián Rivera, 2001). A partir de aquí, dicha actividad deforestadora queda reflejada en todos los registros que acentúan el descenso de *Quercetum mixtum* y el incremento de especies como *Calluna vulgaris*, gran indicadora de degradación del suelo, así como especies ruderales (Jato & Rodríguez, 1986).

El mayor grado de antropización en el paisaje tiene lugar durante el último tercio del Holoceno, como consecuencia de una gran necesidad de madera y tierras agrícolas, que impulsa una gran

expansión de los brezales. Todas las investigaciones apuntan a que a partir de la edad de Hierro (en Galicia se sitúa entre 2500-2400 BP) se habría difundido por todo el país un sistema agrícola de rozas, consistente en la tala y quema del bosque para su transformación en terrenos cultivables (Gutián Rivera, 2001). Las rozas precisan de amplios espacios de monte ya que tras una o dos cosechas la tierra debe descansar durante un período prolongado para recuperar su fertilidad, entre diez y treinta años, tiempo en el que se produce la colonización por el matorral, pero más raramente por el bosque (Portela, 1975 en Gutián Rivera, 2001).

La base de la agricultura primitiva sería el cultivo de cereales por un procedimiento que tiene escasa productividad, ya que agota rápidamente la fertilidad del suelo y esto aparece reflejado en los diagramas polínicos con un incremento de las ericáceas, simultáneamente con *Cerealia*, *Rumex* y *Plantago*, indicadoras claras de la actividad humana (Jato & Rodríguez, 1986). Esta práctica sería la causante de la primera gran fase deforestadora en Galicia y así, cuando comienza la romanización del NO de la Península Ibérica, buena parte de los bosques ya habrían desaparecido, siendo sustituidos por matorrales, praderas y labradíos. Desde ese momento se desarrolla un modelo de evolución del paisaje caracterizado por el predominio del matorral y la discontinuidad de las masas arboladas (Gutián Rivera, 2001); Además, entre los siglos XVII y XIX la expansión del brezal se ve propiciada por una sobreexplotación del bosque para conseguir carbón vegetal para las herrerías (Gutián Rivera, 1993) alcanzándose su máxima entre el siglo XVIII y comienzos del siglo XX (Valdés & Gil Sánchez, 2005).

Hasta la época moderna existe una clara asociación entre mejora de las condiciones climáticas, aumento demográfico, que implica una mayor presión sobre la tierra, y la expansión de los brezales. Además, este sistema ha vinculado estrechamente agricultura, ganadería y aprovechamiento del bosque y el matorral, haciendo de éste último un elemento esencial para la agricultura, como reserva de tierras para el cultivo, pastoreo, producción de abonos, etc. y en este sentido, la utilización del fuego para impedir el desarrollo de la vegetación leñosa constituyó una práctica universal (Gutián Rivera, 2001).

El sistema de explotación tradicional de las montañas gallegas se configuró definitivamente en la Edad Media y ha pervivido hasta nuestros días, basado en la disponibilidad de un territorio variado desde el punto de vista topográfico y edáfico (Gutián Rivera, 2001; López Andión, 2001). La ocupación del territorio consistía en la explotación agrícola intensiva de los fondos de valle, estando los prados en las partes bajas y las aldeas emplazadas a media ladera, preferentemente en solana y aprovechando los fondos de valle más amplios. Las huertas se intercalan entre las casas dando paso a las plantaciones de castaño (*soutos*) o a los campos de centeno (Gutián Rivera, 1993). Hacia la cumbre, se extiende el espacio dominado por el matorral, que a lo largo de los siglos se ha mantenido gracias a estos manejos con prácticas como el pastoreo, la roza para obtención de leña, la quema controlada para regenerar pastos o el esquileo para la cama de ganado (Gutián Rivera, 1993; Izco *et al.*, 2006). Esta distribución de usos implica un trasvase de fertilidad del matorral (*Ulex spp.* mayoritariamente) hacia las tierras agrícolas, primero como cama del ganado, que con

sus deyecciones, lo enriquece en nutrientes formando el estiércol, que constituía el principal abono agrícola.

A finales del siglo XIX y a principios del XX el cultivo de cereales se realizaba en las áreas más adecuadas, durante un periodo de 3 a 7 años; previamente el matorral se había desbrozado y quemado, con el fin de aprovechar la escasa fertilidad y alcalinidad contenida en las cenizas. El cereal principalmente utilizado fue el centeno, y en algunos casos el trigo y la avena. Otro aprovechamiento que se producía en ocasiones era la transformación en un pseudo-cultivo de leguminosas del tipo de las genistas y cistáceas (*Sarothamnus*, *Genista*, etc.) como paso anterior al cambio de uso a praderas y pastizales (Gutián Rivera, 1993; 2001; Marey *et al.*, 2004)).

Durante siglos, los brezales se han mantenido gracias a este **sistema de explotación agrosilvopastoral**, de manera que el papel del hombre en su expansión es evidente (Castroviejo, 1992; Gutián, 1993). Cabe puntualizar sin embargo, que en las etapas anteriores a la aparición de la agricultura, cuando el paisaje gallego estaba dominado por formaciones arbóreas, éstas no eran las únicas comunidades vegetales existentes, ni tenían la composición y la estructura actuales. Los análisis de polen que hacen referencia a esos momentos contienen abundantes muestras de especies propias de ambientes ecológicos distintos al del bosque, entre las que no faltan las gramíneas, brezos, retamas (xestas) o piornos, reflejando la existencia de formaciones forestales poco densas, de manera semejante a lo que estaba ocurriendo simultáneamente en otros territorios europeos (Beltrán, 1976). Otros argumentos confirman además que, incluso antes de la aparición de la agricultura y la deforestación antrópica, los brezales ocupaban una gran extensión y una amplia gama de ambientes. En este sentido, C. y G. Beltrand (1986) recuerdan que la riqueza específica de las ericáceas y en concreto de las ericas que cubren la totalidad del espectro bioclimático y edáfico, permite suponer que el origen de las landas no es únicamente antrópico, ya que de serlo no habrían tenido tiempo suficiente para diversificarse y adaptarse a tan diferentes condiciones ecológicas. Y de igual manera pueden interpretarse otras características generales de los brezales, como su marcado carácter pirófito, sin duda adquirido antes de que el hombre comenzara a utilizar el fuego, dado el corto espacio de tiempo transcurrido desde entonces hasta la actualidad y la lentitud con la que se produce la adaptación genética (Castroviejo, 1992).

Precisamente los **incendios** están considerados uno de los principales factores que favorecen la expansión del matorral, aunque el efecto beneficioso o perjudicial de esta práctica depende de su intensidad y frecuencia. En general, los incendios han favorecido la expansión de especies pirofíticas como el abedul (*Betula celtiberia*) o el tojo (*Ulex spp.*), de manera que en gran parte del territorio la distribución actual de estas especies constituye el resultado de una selección natural propiciada por el cambio de condiciones que suponen los incendios (Silva Pando & Regueiro, 1992). Ecológicamente éstos constituyen episodios profundamente desorganizadores, que destruyen la biomasa, movilizan los depósitos de materia orgánica y nutrientes, permitiendo una mayor incidencia de los procesos ambientales como erosión, radiación incidente y precipitación a nivel del suelo (Casal *et al.*, 1984). La repetición de estos episodios destruye la materia orgánica en la capa más superficial del epipedón, semillas y plántones de las especies más susceptibles, induciendo



un cambio en el sustrato y de la composición de especies, favoreciendo a las mejor adaptadas a las “nuevas” condiciones del medio: xeromorfía, mayor duración del período de sequía estival, debido a la reducción de la profundidad del suelo y competición con especies pirofíticas de crecimiento más rápido. Estos cambios pueden impedir la construcción del bosque original, que es desplazado por formaciones vegetales de menor porte y menos exigentes (piornales, tojales y brezales), capaces de estabilizarse y establecerse de forma permanente por la repetición cíclica de los mismos (Basanta *et al.*, 1989).

Los fuegos recurrentes han ido seleccionando las especies capaces de adaptarse a las nuevas condiciones, favoreciendo el desarrollo de plantas que rebrotan a partir de rizomas y bulbos (*Pteridium aquilinum*, *Asphodelus albus*) o raíces (*Erica australis*, *E. arborea*, *E. umbellata*, *Ulex gallii*) que caracterizan las primeras fases de recolonización. (Basanta *et al.*, 1989). Además, los choques térmicos producen una estimulación de la germinación en muchas especies (Reyes & Casal, Reyes *et al.*, 2000). Estas dos estrategias reproductivas no son excluyentes, ya que algunas especies se reproducen tanto por rebrote como por germinación. Las gramíneas (*Molinia*, *Agrostis*) aumentan su presencia, en detrimento de las especies de brezos, sobre todo en las zonas en las que se han aplicado encalantes para corregir la acidez de los suelos naturales. Esta actividad se sostiene de forma perdurable provocando la combustión de la planta adulta a fin de obtener los rebrotes más tiernos de tojos y brezos, más apetecibles por el ganado. El resultado de estas acciones antrópicas genera una dinámica que mantiene al ecosistema forestal original en un estado permanentemente alejado del clímax y provoca el rejuvenecimiento del matorral y su rápida recuperación, tal y como se desprende de la revisión realizada por Muñoz (2008). Los efectos de los incendios sobre la colonización vegetal, las estrategias específicas de supervivencia de las especies y la regeneración del matorral en Galicia, han sido estudiados desde hace décadas en el Departamento de Ecología de la USC. Los trabajos más recientes (Muñoz, 2008) acerca de la quema y roza de *E. ciliaris* y *E. tetralix* señalan que la regeneración por rebrote de ambas especies tiene lugar en poco tiempo, alcanzándose los valores de cobertura previos a las perturbaciones. En cambio, los manejos severos, como incendios reiterados pueden hacer que el brezal se transforme en una comunidad herbácea como ya habían constatado otros autores (Legg, 1995) y es bien conocido en Galicia por ser la práctica habitual para transformar el matorral en pastizal. En consecuencia, esta autora propone la quema controlada y las rozas como sistemas de gestión sostenible para el mantenimiento de estos brezales.

Ambas prácticas se pueden considerar consustanciales a la configuración del paisaje gallego donde el ganado caballar y vacuno pastorean en libertad las formaciones de matorral. La reiteración de las quemas genera un pastizal que, si bien mantiene la composición de especies característica del matorral original, no presenta la misma abundancia relativa de las especies y muestra una fisonomía que varía desde la de un matorral escasamente alterado hasta la pradera polifítica de pratenses sembradas (Figura I.7). Esta variedad de hábitats, que se pueden ordenar según el grado de naturalidad, depende del grado de manejo de la formación y de la carga ganadera que soporta: ganado caballar de manera generalizada, y vacuno en las mejores parcelas debido a su mayor exigencia en cuanto a la calidad del pasto.



Figura I.7. La secuencia de fotografías muestra la modificación de la fisonomía de las formaciones vegetales desde el matorral original que es pastoreado por caballos en libertad (izqda.) a los efectos del aprovechamiento por ganado vacuno en régimen extensivo (centro). Si la presión ganadera es más intensa las gramíneas dominan sobre las especies propias del matorral (dcha.)

En cuanto a la **fisonomía del matorral**, el aspecto de estas formaciones es generalmente almohadillado y su altura máxima depende de la composición de especies, variando entre 10 cm y 1-2 m., según las especies presentes. La fisonomía general de la formación puede variar en respuesta a algunas condiciones del medio, generando un aspecto diferente de las plantas que implica la variación en la altura de las matas y la disposición de las ramas en relación con el suelo. Así, en las zonas expuestas a los vientos la altura de la planta resulta ser notablemente inferior a la habitual de la especie y el aspecto achaparrado de las matas es general para todas las especies de la formación en comparación con otras localizaciones (Figura I.8, izqda.).

Hay que destacar el importante papel que el ganado posee en la fisonomía del brezal. Por un lado, el tránsito en las zonas donde pasta el ganado caballar y vacuno en libertad, suele formar pequeños rodales distribuidos en núcleos separados por una densa red de veredas, que son ocupadas por vegetación herbácea (Figura I.8, dcha.). Por otro lado, el pastoreo extensivo por ganado caballar y vacuno en libertad limita el crecimiento del tojo debido a que los caballos muestran preferencia por sus brotes tiernos, ricos en nitrógeno. En comparación, las plantas de brezo son menos apetecibles por lo que resultan sometidas a un aprovechamiento menos intensivo. En esta situación pueden crecer con tasas superiores a las del tojo, alcanzando porte y altura máxima, característicos de la especie si se le permiten las condiciones físicas del lugar de ubicación. De esta manera, el ramoneo superficial de la mata almohadillada elimina los brotes tiernos del tojo que aparecen entremezclados con las ramas de los brezos, de donde se deduce el efecto directo del ganado sobre la altura de las matas. Sin embargo, en el interior, las ramas espinosas del tojo “arman” la mata almohadillada, lo que constituye un límite a la acción del ganado, reduciendo el consumo.



Figura 1.8. Izqda: En exposición a vientos constantes la altura de las matas se reduce de forma notable en los brezos (*Calluna vulgaris* y *Erica umbellata*) y sobre todo a *Ulex europaeus*. Dcha.: El efecto del ganado se manifiesta por la presencia de una densa red de veredas que separan pequeños rodales.

Sin el efecto del ganado, y en ausencia de factores físicos limitantes, el crecimiento de las leguminosas y el aumento de su biomasa son constantes, pudiendo alcanzar el tojo un porte considerable, con alturas de 2-3 m, y generando una cobertura monoespecífica del 100%. En estos casos la presencia de brezos y otras especies características del matorral, se encuentra relegada a los bordes de los caminos y taludes expuestos, donde la radiación solar sí es suficiente para su desarrollo (Figura 1.9). En general, las fases de desarrollo más avanzadas del matorral se describen como tojales colonizados casi exclusivamente por *Ulex* (y otras leguminosas), en los que prácticamente desaparecen las otras especies de la comunidad (Soñora, 1995).



Figura 1.9. Sin límites a su crecimiento, el tojo puede alcanzar porte arbóreo y una cobertura del 100% en la formación del matorral (Izquierda). En estas condiciones, la presencia de brezos y otras especies características del matorral queda relegada a los bordes de los caminos y taludes, donde la exposición solar sí es suficiente para su desarrollo (Derecha).

En las últimas décadas el matorral ha venido ocupando en Galicia un tercera parte de su superficie forestal (Balboa, 1990, Xunta de Galicia, 2001). La superficie perteneciente a esta formación ha disminuido considerablemente a lo largo de este último siglo, no sólo en Galicia sino también y de forma especialmente intensa en toda la franja atlántica europea (Izco & Amigo, 2002; Alonso, 2004). Comparando los resultados del 2º y del 3º Inventario Forestal Nacional, que se recogen en la Tabla 1.2 se aprecia que la superficie ocupada por el matorral ha pasado de 922.935 ha a



634.123 ha, lo que supone una disminución del matorral en superficie equivalente a casi el 10% de la superficie gallega, tan solo en el tiempo transcurrido entre los dos inventarios. Entre las causas de la desaparición de los brezales se suelen señalar el abandono de los usos tradicionales, que ha supuesto la sustitución del matorral y pastizal por las plantaciones forestales; inversamente, la transformación de matorral en praderas para lograr un aprovechamiento intensivo de las formaciones “a monte”, que producen cambios en las condiciones de fertilidad, siendo la subida del pH por encalado y los aportes nitrogenados los que causan la rápida sustitución de los brezos por las herbáceas, más competitivas en suelos más fértiles. La ocupación directa debido a la construcción de infraestructuras, minería, presión turística, etc. son otras causas comúnmente enunciadas (Izco & Amigo 2002; Alonso, 2004; Díaz Vizcaíno, 2005).

Tabla I.2. Datos para Galicia del 2ª (IFN2) y 3ª (IFN3) Inventario Forestal Nacional

Inventario	Período	Superficie matorral (ha)	Superficie forestal total (ha)
IFN3	(1997-2007)	634.123	2.039.575
IFN2	(1986-1996)	922.935	1.968.311

Las cifras recogidas por el correspondiente Inventario Forestal Nacional se refiere únicamente a la extensión de la fracción denominada “monte desarbolado”, con fracción de cabida cubierta inferior a 5%, pero la superficie ocupada por las formaciones de matorral resulta ser superior a los resultados de su cuantificación cartográfica. El motivo principal es que, con variado grado de naturalidad, se encuentran formando parte del sotobosque de las masas arbóreas autóctonas y sobre todo, de algunas repoblaciones (Figura I.10). La presencia de estas formaciones en el sotobosque de las plantaciones merece ser tenida en cuenta a efectos de conservación de la biodiversidad puesto que esta vegetación constituye reserva y fuente de propágulos (semillas y plantones) mientras que el sustrato edáfico subyacente alberga el banco de semillas (Putwain & Gilham, 1990; Pywell *et al.*, 1994, 2002).



Figura I.10. Las repoblaciones con especies forestales de crecimiento rápido se realizan tradicionalmente sobre las formaciones de matorral. En muchos casos constituyen un importante reservorio de plantas y semillas, por tanto, de garantía de conservación.

A la vista de lo expuesto hasta ahora, se comprende el papel que las acciones antrópicas directas (rozas, fuego) o indirectas (ganado) han ejercido milenariamente sobre el origen, diversificación y expansión de brezos, leguminosas y plantas acompañantes, que componen el ecosistema terrestre denominado matorral. En consecuencia se comprende que, en lo que se refiere a la **gestión de los brezales**, las prácticas más adecuadas para su conservación sean las tradicionales. La diversidad de hábitats viene limitada en último término por las condiciones físicas del medio y, aunque *a priori* pueda parecer paradójico, aumenta con la presión de uso, generando el típico paisaje en *bocage*. El origen del paisaje en estas zonas es por tanto un paisaje básicamente cultural, originado por la acción antrópica sobre los sistemas naturales y refleja los efectos de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales que centran la actividad económica. Pero este sistema de explotación entra en crisis a mediados del siglo pasado, como consecuencia de la disminución y el envejecimiento de la población gallega. Se instaura un nuevo modelo de evolución del paisaje que se caracteriza por el abandono de los campos de cultivo, lo que conduce a la recolonización vegetal y la reconstrucción del bosque (Gutián Rivera, 1993, Marey *et al.*, 2004). En efecto, el cese de las actividades ganaderas y el abandono de las explotaciones, permite la evolución del ecosistema hacia el estado clímax, un proceso que puede resultar indeseable bajo el punto de vista ambiental si, como en el caso que nos ocupa, supone una considerable pérdida de biodiversidad. Por ello, el abandono de las explotaciones ganaderas en las zonas de montaña se ha convertido en el principal motivo de preocupación en el ámbito europeo porque compromete la conservación y pervivencia de hábitats, tanto en su acepción ecológica más próxima a “conjunto de biotopo y biocenosis” como en el sentido protector y conservacionista dado por la Directiva Hábitats. Una revisión somera de la literatura especializada en conservación, recuperación y restauración de brezales refleja una gran diversidad de situaciones, de procedimientos y de puntos de vista bajo los que se realizan los estudios, que generalmente suelen ser a escala local.

Por otro lado, el abandono de las actividades agrosilvopastorales conduce al incremento de la **biomasa** en estos sistemas, lo que los hace fácilmente combustibles; parte de esta biomasa se puede utilizar para la generación de energía reduciendo el riesgo de incendios forestales (Rigueiro, 1998). Los primeros trabajos realizados en Galicia para evaluar la biomasa del bosque y del matorral fueron dirigidos por M. Bao, en el Departamento de Ingeniería Química de la USC. Estaban centrados en el aprovechamiento integral de *Ulex spp.* (Couceiro, 1983; Lorenzo, 1998) previo fraccionamiento, separando las partes con mayor contenido proteico para elaboración de piensos compuestos (Rivera, 1986; Garrote, 1989; de Vega, 1990) y con aprovechamiento de sus componentes lignocelulósicos para la obtención de biocombustibles (Domínguez, 1997). En Galicia se producen del orden de 8 MM de t anuales de residuos lignocelulósicos asociados a la producción forestal (tala, poda, limpieza y producción en matorral). Estos residuos deberían ser aprovechables en menos de un 25% dentro de una gestión forestal sostenible, pues la incorporación de restos orgánicos al suelo supone el aporte de materia orgánica, la reutilización de nutrientes y la consiguiente mejora de sus propiedades edáficas (Bao, 2003). La biomasa del bosque y del matorral serviría para la obtención de biocombustibles (principalmente biofuegos líquidos) y para la producción de calor o calor y energía mediante cogeneración (Bao, 1998; 2003).

En su informe *Potencial de la biomasa forestal en Galicia* (2006), la Consellería del Medio Rural de la Xunta de Galicia cifra la disponibilidad anual de biomasa forestal primaria (BFP) en 852.171 t de materia seca para la totalidad de los bosques gallegos. Un año después, Galicia es la segunda comunidad autónoma en potencialidad de producción de biomasa forestal a partir de monte arbolado y matorral, y se estima que se podrían obtener unos 2 MM t de materia verde por año a partir de terrenos forestales y agrícolas marginales (Rigueiro, 2007). Ese mismo año la Xunta de Galicia promulga la Ley 3/2007, de prevención e defensa contra os incendios forestales de Galicia, que obliga a los propietarios de montes a mantenerlos en condiciones que contribuyan a prevenir los incendios forestales, respetando especialmente las cuestiones relativas a la gestión de la biomasa vegetal. Esta norma podría ser la herramienta legislativa que impulsara el desarrollo de industrias para la obtención de biocombustibles a partir de residuos forestales en Galicia.

Las políticas energéticas actuales incentivan el uso del potencial de producción de energía a partir de biomasa. En el año 1997, se publica el “Libro Blanco de la Energía” de la Unión Europea, que intenta establecer un plan de acción comunitaria con el objetivo de alcanzar para el 2010 una cuota de un 12% en energías renovables. La Directiva 2001/77/CE fija además el objetivo de alcanzar el 20% en el 2020 y, en este sentido, la Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia promueve que las Comunidades Autónomas propongan planes autonómicos de uso intensivo de biomasa. El Real Decreto 661/2007, regula la producción de energía eléctrica en régimen especial fomentando el uso de la biomasa forestal y, paralelamente, la Política de Desarrollo Rural (2007-2013) de la UE establece medidas de ayudas a las energías renovables, incluyendo el uso energético de la biomasa forestal.

La Xunta de Galicia está elaborando el Decreto que regula la autorización de las instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de Biomasa Forestal Primaria (BFP), es decir, aquella generada directamente de los residuos forestales susceptibles de un aprovechamiento energético. Actualmente funcionan varias plantas de biomasa que se alimentan de los residuos de procedencia industrial, generados por la industria maderera, debido a cuestiones de rentabilidad económica (Arrieta, 2008). El objetivo para el 2012 es la instalación en Galicia de 7 plantas de BFP con una potencia máxima de 80 MW (Tabla I.3) según el Plan técnico de aprovechamiento energético de la biomasa forestal (2007).

Tabla I.3. Previsión de la evolución del aprovechamiento de la biomasa forestal en Galicia

	2006	2010	2012
Energía eléctrica (MW)	39	65	80
Potencia térmica (MWt)	450	580	650

Fuente: *Plan técnico de aprovechamiento energético de la biomasa forestal* (2007).

El aprovechamiento energético de este recurso a partir del matorral actualmente es prácticamente inexistente y su viabilidad suscita dudas, pues podría suponer el empobrecimiento del suelo y su degradación por erosión, sin olvidar las extensas áreas de matorral gallego que incluyen hábitats en

la Red Natura. (Rigueiro, 2007). En efecto, sería conveniente considerar con especial atención el destino de las extensas áreas de matorral que poseen valor de conservación establecido por la Directiva Hábitats (véase más adelante), al quedar incluidas en los Lugares de Interés Comunitario pertenecientes a la Red Natura. Se trataría por tanto de armonizar los distintos usos del matorral (forestal, industrial, conservación) en el territorio de la Comunidad Autónoma. Al mismo tiempo, y a fin de asegurar la conservación de las formaciones en las zonas protegidas, mantener el aprovechamiento tradicional o, alternativamente, realizar un manejo que prevenga los incendios forestales y conserve las características de la formación en términos de diversidad y composición de especies, grado de naturalidad, etc.

### I.3. VALOR DE CONSERVACIÓN

La formación de matorral engloba varios tipos de hábitats considerados por la Directiva Hábitats con distinto grado de protección:

- **Hábitats de interés comunitario**, los que en el territorio de la Comunidad se encuentren amenazados de desaparición en su área de distribución actual, presenten un área de distribución natural reducida a causa de su regresión o debido a su área intrínsecamente restringida o constituyan ejemplos representativos de características típicas de una o varias de las cinco regiones biogeográficas: alpina, atlántica, continental, macaronésica y mediterránea.
- **Hábitats naturales prioritarios**, los amenazados de desaparición presentes en el territorio de la Comunidad, cuya conservación supone una especial responsabilidad para la Comunidad habida cuenta de la importancia de la proporción de su área de distribución natural incluida en el territorio de la Comunidad.

Para conocer el valor de conservación de las formaciones de matorral presentes en Galicia, se han establecido las correspondencias entre los distintos hábitats y las asociaciones vegetales identificadas en el campo, siguiendo los criterios y descripciones contemplados en los sucesivos documentos titulados “Manual de Interpretación de los Hábitats de la Unión Europea” (*Interpretation Manual of European Union Habitats*). Estos documentos han sido desarrollados por el Grupo Científico designado por el Comité de Hábitats, y establecido a su vez por la <sup>1</sup>Directiva Hábitat 97/62/CE, que expresó la necesidad de unificar los criterios en las clasificaciones de los Hábitats Naturales Prioritarios como aspecto más inmediato a desarrollar. La versión más reciente (EUR 25. Octubre 2003) se encuentra disponible en la dirección <http://www.europa.eu.int> y no difiere sustancialmente de la publicada en el año 1996 en lo que se refiere a las condiciones fundamentales (tipos de suelos, comunidades o asociaciones vegetales y composición florística) que requiere la definición de los hábitats considerados en este estudio. La excepción es el hábitat 4030 Brezales

<sup>1</sup> **Directiva 97/62/CE**<sup>1</sup> del Consejo de 27 de octubre de 1997 por la que se adapta al progreso científico y técnico la Directiva 92/43/CEE, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de fauna y flora silvestres (*Diario Oficial n° L 305 de 08/11/1997 P. 0042 – 0065*).

secos, incluido inicialmente entre los prioritarios en el Diario Oficial y que tras la revisión pertinente por parte de la Comisión y consultados los distintos documentos del Consejo Europeo, se decidió incluir a Brezales secos (Todos los subtipos) (actualmente denominado Brezales secos europeos) en el Anexo de hábitats naturales de interés. Según el referido Manual, los Hábitats Naturales (prioritarios y de interés) definidos por la presencia de brezos, que se pueden encontrar en Galicia, son los que se recogen en la Tabla I.4.

Las especies *Erica mackaiana* y *Erica tetralix* también se pueden encontrar formando parte de otros hábitats naturales prioritarios como son las turberas (7120 Turberas Elevadas Degradadas, susceptibles de regeneración natural; 7130 Turberas de cobertor; y 7140 Turberas de transición y tremedales). Sin embargo, en estos casos el factor ambiental que define la existencia del hábitat es la presencia de turba independientemente de que la composición vegetal que sustente de forma natural sea arbustiva o herbácea.

El Manual de Interpretación de la Directiva Hábitats también incluye el hábitat 4010 *Brezales húmedos del Atlántico Norte con Erica tetralix* (C.P.: 31.11) y lo defino como matorral húmedo, sobre suelos turboso o semiturbosos (que no sean turberas de cobertor), de los dominios atlántico y subatlántico. En este trabajo se ha obviado su consideración por resultar redundante e innecesario, aplicando el siguiente criterio: Las formaciones vegetales con presencia de los brezos de las brañas (*E. ciliaris*, *E. tetralix* y *E. mackaiana*) se adscriben al hábitat prioritario 4020 *Brezales húmedos atlánticos templados con Erica ciliaris y Erica tetralix*, siempre y cuando el sustrato edáfico sea mineral o, siendo semiturboso muestre influencia terrígena. Y se asignan a los hábitats de turberas (7120, 7130, 7140) si el sustrato edáfico es turboso o turberiforme.

El valor de conservación de la formación de matorral se extiende a otros grupos faunísticos que el medio acoge de forma permanente o temporal. En este sentido está considerado entre los ocho más importantes (Tucker & Evans, 1997), con interesantes características ecológicas condicionadas por factores bióticos (sucesiones botánicas, pastoreo) y abióticos (fuego, clima, suelos). La fauna de invertebrados es rica y variada, sobre todo en zonas de alta diversidad estructural del medio y durante el período primaveral. Localmente se han detectado hasta 16 aves prioritarias a nivel europeo en estos tipos de hábitats (Fontán & Tapia, 2003).



Tabla I.4. Hábitats Naturales definidos por la presencia de brezos

<p><b>4020 (*) Brezales húmedos atlánticos templados con <i>Erica ciliaris</i> y <i>Erica tetralix</i> [C.P.: 31.12]</b></p> <p>Brezales higrófilos de áreas con clima templado oceánico, sobre suelos semiturbosos o desecados, con materia mineral en superficie si son suelos turbosos (hidromor), con vegetación de las alianzas <i>Genistion micrantho-anglicae</i> y <i>Ulicion minoris</i>: <i>Ulici minoris-Ericetum ciliaris</i>, <i>Ulici gallii-Ericetum mackaiana</i>, <i>Ulici minoris-Ericetum tetralicis</i>, <i>Cirsio filipenduli-Ericetum ciliaris</i>.</p> <p>Brezos: <i>Erica ciliaris</i>, <i>Erica mackaiana</i>, <i>Erica tetralix</i></p>
<p><b>4030 Brezales secos europeos [C.P.: 31.2]</b></p> <p>Brezales mesófilos o xerófilos sobre suelos silíceos, podsólicos en los climas húmedos atlánticos y subatlánticos de las planicies y colinas de Europa occidental, central y septentrional.</p> <p>Brezales de <i>Calluna-Genista</i> subatlánticos. <i>Calluno-Genistion pilosae</i></p> <p>Brezales <i>Erica-Ulex</i> atlánticos. <i>Ulicenion minoris</i>; <i>Daboecion cantabrica</i>; <i>Ulicion maritimae</i>. Brezales ricos en tojo (<i>Ulex</i>) de las márgenes atlánticas.</p> <p>Brezales <i>Erica-Ulex-Cistus</i> ibero-atlánticos. <i>Daboecion cantabrica</i>; <i>Ericenion umbellata</i>; <i>Ericenion aragonensis</i>; <i>Ulicion maritimae</i>; <i>Genistion micrantho-anglicae</i>. Brezales de Aquitania con <i>Cistus</i>. Brezales ibéricos con numerosas especies de brezos (de forma notable <i>Erica umbellata</i>, <i>E. aragonensis</i>), <i>Cytisus</i>, <i>Cistus</i> y a menudo <i>Daboecia</i>. Cuando <i>Cistus</i> y otras especies mediterráneas se hacen dominantes, se clasificarán como matorral esclerófilo (C.P. 32).</p> <p>Brezales de <i>Erica cinerea</i> Boreo-Atlánticos</p> <p>Brezos: <i>Calluna vulgaris</i>, <i>Erica cinerea</i>, <i>Erica mackaiana</i>, <i>Erica vagans</i>, <i>Erica umbellata</i>, <i>Erica aragonensis</i>.</p>
<p><b>4040 (*) Brezales costeros atlánticos secos con <i>Erica vagans</i> [C.P.: 31.234]</b></p> <p>Brezales costeros de áreas templadas con <i>Erica vagans</i> y <i>Ulex europaeus</i> sobre suelos bien drenados, que no sean formaciones marítimas postradas.</p> <p>Brezos: <i>Erica vagans</i></p>

(C.P.: Clase Paleogeográfica)

#### I.4. EL ECOSISTEMA MATORRAL

Aunque el ecosistema matorral haya estado sometido en los últimos años a un proceso intenso de transformación, sigue siendo la formación vegetal más extensa el paisaje de Galicia, siendo destacable tanto la variedad de especies presentes en la formación como la diversidad de formas que adopta esta última (Figura I.11).



Figura I.11. Imágenes ilustrativas de la diversidad que muestra la formación de matorral en Galicia.

Este ecosistema comprende una serie de comunidades vegetales consideradas por los botánicos de carácter serial, esto es, con origen en la degradación del bosque climático, considerándose paisajes antropizados y de transición, que sin intervención humana se transformarían con el paso del tiempo en bosques que sería la formación propia del clímax climático. Sin embargo, en otras localizaciones podría constituir la **vegetación clímax edáfico**, especialmente donde la vegetación arbolada no puede establecerse o desarrollarse debido a la persistencia de fuertes vientos (Figura I.12, izquierda.) o de un cierto grado de hidromorfía en el sustrato edáfico (Eyre, 1968) y en general, en aquellas

situaciones en las que la ausencia de un sustrato con la profundidad adecuada impide el establecimiento y desarrollo de la comunidad del bosque (Figura I.12, dcha). Prescindiendo de estas áreas donde los efectos de los factores físicos influyen decisivamente en la desaparición del árbol sobre la zona de cumbres, cabe notar que estas formaciones aparecen instaladas casi siempre por encima de los actuales límites de los bosques, pero muy por debajo del límite natural (potencial, a largo plazo) de éstos, a los que sustituyen; en estas localizaciones se consideran derivaciones regresivas, originadas por la actuación antropozoógena sobre el bosque y que amplían los dominios del matorral propio de niveles superiores (Ceballos, 1945).



Figura I.12. En la fotografía de la izquierda se aprecia la disminución de la densidad arbórea con la altitud dando paso al protagonismo del brezal (A Ermida, Ourense). A la derecha brezal xeromorfo en la ladera meridional del monte Porto do Riobó (Serra do Xistral), compuesto por *Halimium alyssoides* y *Calluna vulgaris*, sobre coluvios cuarcíticos.

En todo caso, el ecosistema matorral se caracteriza por unas condiciones físicas (climáticas y edáficas) y bióticas (flora y fauna) muy diferentes a las del bosque originario. Las principales diferencias atañen a la profundidad del suelo, la disponibilidad de nutrientes, el grado de humedad ambiental y edáfica (superior en el bosque), la amplitud térmica y la exposición solar directa (superiores en el matorral), lo que supone unas condiciones ambientales bastante más rigurosas y que requieren una serie de adaptaciones concretas a fin de garantizar la viabilidad de las poblaciones y comunidades vegetales presentes. El incremento de los procesos erosivos con denudación prácticamente total de los suelos genera la degradación de ciertas comunidades de matorral en beneficio de otras, que se muestran mejor adaptadas a los suelos intensamente degradados. En cuanto al fuego a que se somete de forma regular, aunque reduce inicialmente su desarrollo, en general actúa como un elemento positivo para incrementar la superficie ocupada por las especies de brezo en relación al tojo (*Ulex sp*) que, como ya se ha comentado anteriormente, dominaría la composición en los últimos estadios de la sucesión vegetal.

El modelo de ecosistema matorral más simple que se puede concebir a partir del paisaje gallego (Figura I.13) consta básicamente de: vegetación compuesta por tojos y brezos (productores); ganado caballar en libertad (consumidores primarios) como la especie con mayor efecto sobre la anterior; y los microorganismos descomponedores (hongos y bacterias) que incorporan finalmente la materia al suelo, cerrando los ciclos biogeoquímicos de los elementos. Este ecosistema mantiene conexiones funcionales con transferencia de materia y energía, con otras formaciones vegetales



(arbolado, pastizal, pradera) debido a la presencia y actividad de la fauna que requiere un amplio territorio para completar sus ciclos vitales como por ejemplo, las aves de presa y mamíferos carnívoros.

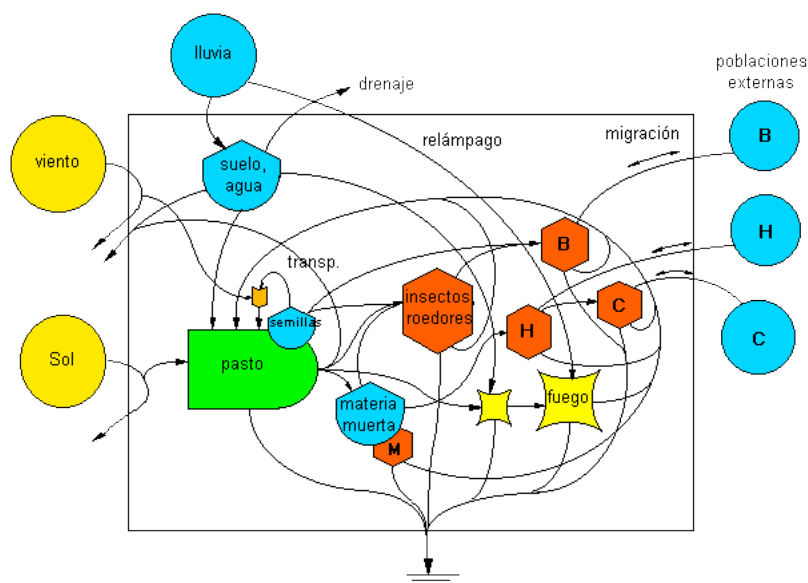


Figura I.13. Esquema general del funcionamiento del ecosistema matorral (modificado de Odum *et al.*, 1988). H= herbívoros; M = microorganismos descomponedores; B = avifauna, C = mamíferos carnívoros.

Entre los **productores** que sustentan el funcionamiento de las redes tróficas (y los ciclos biogeoquímicos de los elementos) se encuentran como componentes principales brezos, tojos y la *carqueixa* (*Pterospartum tridentatum*) que, para mayor eficacia en la obtención de los escasos nutrientes que ofrece el sustrato edáfico, establecen **relaciones simbióticas** con microorganismos del suelo. Tojos y carqueixa pertenecen a la familia de las leguminosas y su fuente principal de nitrógeno es el  $N_2$  atmosférico, que obtienen en simbiosis con bacterias fijadoras que viven en nódulos formados en sus raíces. Este hecho, aunque limita su presencia en zonas hidromorfas donde la difusión del  $N_2$  es muy lenta o nula, les proporciona una cierta ventaja en comparación con otras especies no leguminosas en la colonización de las superficies desprovistas de cobertura vegetal como ocurre, por ejemplo, tras los incendios (Casal *et al.*, 1984). Más interesante resulta la adquisición de nitrógeno y fósforo por parte de los brezos, que tiene lugar gracias a la colaboración de micorrizas ericoides, como indican Mitchell y Gibson (2006) en su revisión:

Los suelos brezal presentan cantidades muy bajas de N disponible, debido a que las tasas de descomposición son pequeñas (Straker, 1996; Haselwandter, 1997). Sin embargo, los hongos micorrícicos son capaces de obtenerlo a partir de diferentes formas de N edáfico: la fracción de N orgánico (Stribley & Read 1974), proteínas ((Bajwa & Read 1985) o quitina (Leake & Read 1990; Kerley 1993). De forma similar las micorrizas ericoides son capaces de compensar el escaso P inorgánico del suelo utilizando fuentes orgánicas de P, como fitatos complejados con Fe y Al (Mitchell y Read, 1981).

Las asociaciones con micorrizas ericoides se encuentran en los suelos de brezal con humus mor del Hemisferio Norte, donde el nutriente limitante es el nitrógeno; en suelos turbosos, muy ricos en

materia orgánica o arenosos, en general donde la disponibilidad de nutrientes es baja (Read, 1983). Se encuentran en regiones donde la estación de crecimiento es corta y la descomposición de hojarasca, lenta. La localización de las raíces más pequeñas que albergan micorrizas ericoides es también peculiar, encontrándose en la zona más superficial del epipedón y bajo la capa de hojarasca en descomposición; otras especies de la formación de matorral enraízan por debajo de los 10 cm (Read, 1996).

En cuanto a los **consumidores** primarios, caballos y vacas constituyen las especies principales debido al constante ramoneo que ejercen sobre la vegetación, concretamente: sobre la presencia, frecuencia y abundancia de las especies del matorral, debido las preferencias por los tojos en detrimento de los brezos y por las gramíneas frente a los tojos; sobre el mantenimiento de la composición florística de las formaciones, impidiendo el avance de la formación hacia el estado clímax; y finalmente, sobre la competencia de las especies del matorral frente a las gramíneas por un sustrato próximo a las matas, desnudo y pobre en nutrientes.

Con respecto a este último aspecto, cabe tener en cuenta que la expansión de las gramíneas entre las especies arbustivas está favorecida tanto por la forma de dispersión de las semillas (anemocoria) como por su crecimiento vegetativo por medio de rizomas. Como resultado, las gramíneas generan densos tapices que excluyen a las especies del matorral y en una situación de competencia con los brezos, las gramíneas obtienen más beneficios según aumenta de la presión ganadera (mayor fertilización con estiércol y purines), desde el pastizal con veredas hasta la pradera polifítica. Por el contrario, si se mantiene una presión ganadera moderada, la integridad los arbustos se mantiene y aún se refuerza la fisonomía almohadillada de la formación, con mejor fortuna al parecer cuando tojos y brezos se encuentran asociados en la misma mata:

La proximidad física de las plantas en las matas del brezal, lejos de ser un inconveniente (competencia por espacio físico y sustrato), supone un notable aumento de las ventajas. En efecto, la disposición en forma de matas sobre el terreno ofrece obstáculos al viento y favorece la deposición de las partículas que pueda llevar éste, como sedimentos, semillas y hojarasca, concentrándolas en las proximidades de las matas en comparación con una zona rasa. En cierta medida, la forma almohadillada contribuye a concentrar materia orgánica en los alrededores, aumentando hasta cierto punto, los niveles de fertilidad del suelo. Puesto que, en último término el ecosistema se fundamenta en las relaciones tróficas que mantienen tojos y brezos con microorganismos simbioses del suelo, la asociación de especies en una mata hace disponible para todas las plantas una mayor cantidad de nutrientes que los que pueden obtener creciendo aisladamente (mutuo beneficio). Los brezos dependen del suministro de N edáfico a través de las micorrizas, que deben explorar un volumen de suelo inferior si las raíces del brezo se entremezclan con las del tojo, y este último es más independiente en cuanto a la fuente de N pero su crecimiento está limitado por el efecto del ganado, que lo prefiere frente a los brezos.

Vista la asociación frecuente de leguminosas (tojos) y brezos en todas formaciones de matorral (excepto en suelos encharcados, limitantes al establecimiento y desarrollo del tojo) y el éxito de la formación que se refleja en su extensión por toda Galicia, cabe deducir la existencia de una relación

de **mutualismo** entre las especies principales del matorral. Dicha relación se sustentaría en el importante papel que juegan las micorrizas, que no sólo permiten la extracción de nutrientes del suelo en todo tipo de hábitats, sino también a través de conexiones entre brezos y tojos (Fraga, com. pers.), que son los componentes principales del ecosistema.

Los ciclos biogeoquímicos de los ecosistemas terrestres que dan comienzo con la fotosíntesis y con la obtención de nutrientes del suelo, se cierran en el sustrato edáfico por mediación de los organismos **descomponedores** de la materia orgánica muerta que, en último término y como resultado de su actividad metabólica, oxidan parte de la materia orgánica hasta  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en condiciones aeróbicas mientras en ambientes anaerobios generan diversos productos reducidos: ácidos orgánicos de cadena corta,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,... Se trata de una notable variedad de hongos y bacterias cuya actividad regula la disponibilidad de nutrientes esenciales para la vegetación y que depende estrechamente de las condiciones ambientales físicas:

En general la actividad de los microorganismos del suelo está determinada por las bajas temperaturas y en muchos hábitats por la frecuencia y duración que las precipitaciones. En clima frío las velocidades de reacción son relativamente bajas y esto afecta tanto a los procesos de alteración mineral (alteración física, química y biológica) como a los procesos de descomposición y mineralización de la materia orgánica muerta. En esta situación, las elevadas precipitaciones que tienen lugar a lo largo de todo año, salvo por un periodo de sequía estival de duración variable, contribuyen al predominio de las condiciones anaeróbicas en el suelo, lo que condiciona a su vez, una baja tasa de descomposición de los restos orgánicos y su acumulación en el epipedón con el paso del tiempo. Como consecuencia de la retención de nutrientes en la material orgánica del suelo y del lavado del perfil del suelo en zonas de elevadas precipitaciones, se comprende que la disponibilidad de nutrientes para las plantas, dependiente en último extremo de los microorganismos del suelo, puede resultar muy baja (y dependiente del clima).

Uno de los aspectos que más llaman la atención sobre los brezos es el conjunto de **adaptaciones** a la sequía que presentan. Así, son plantas de hoja perenne, longevas y con bajas tasas de crecimiento; suelen florecer y formar semillas de forma irregular y colonizan lentamente sus hábitats favorables (Gilbert & Anderson, 1998). Este aspecto es más llamativo todavía si se tiene en cuenta que en general los brezos se presentan en las regiones europeas con clima de carácter oceánico, no excesivamente seco ni sujeto a variaciones térmicas extremas, y aunque su estructura les permite soportar periodos de acusada sequía, exigen un cierto grado de humedad que si no proviene de una pluviosidad suficiente, suele obtenerse de las abundantes brumas siempre frecuentes en las zonas propias de estas formaciones, por lo común al alcance de las influencias oceánicas (Díaz Vizcaíno y col., 1989).

Sin embargo, el tipo de hábitat genérico que ocupan las comunidades de matorral en Galicia se caracteriza por unas condiciones francamente difíciles para el establecimiento y supervivencia de muchas especies vegetales. Entre los factores principales que limitan la capacidad de crecimiento de las plantas identificados por Grime (1979) y Grime *et al.* (1988), se encuentran baja fertilidad de suelo, escasa o demasiada luz, sequía, condiciones anaerobias o suelos esqueléticos. En contraste

con un ambiente más rico en nutrientes los medios gobernados por factores físicos o bióticos que imponen condiciones de estrés son aprovechados por brezos y tojos, que parecen encontrar su óptimo ecológico al no tener la competencia de otras plantas más exigentes. Estas adaptaciones que se reconocen en los brezos son equiparables a las de la esclerofilia del matorral mediterráneo y a efectos del funcionamiento del ecosistema conllevan la ralentización de los procesos mediados por los otros componentes bióticos (Terradas, 2001); el motivo es que el bajo contenido foliar de nutrientes (N y sobre todo, P) y la relación fibra/proteína redundan en una inferior palatabilidad para el ganado (consumidores primarios en general). Por otro lado la presencia de fenoles, ligninas y taninos retiene el escaso N disponible en el suelo en forma de complejos orgánicos, lo que implica una disminución de las tasas de descomposición y mineralización de la materia orgánica, mediadas por los microorganismos del suelo, hongos y bacterias. En conjunto estas interacciones entre las especies del ecosistema matorral, vienen a reforzar la tendencia al estatus oligotrofo del hábitat en que se encuentran los brezos, excluyendo a las especies más exigentes en nutrientes, como las gramíneas.

La adaptación a la sequía de los brezos debió producirse en el comienzo, el estrés hídrico es un fenómeno estacional en muchos brezales secos y, en lo que respecta a su duración, aumenta desde casi cero en las regiones que reciben precipitaciones de manera uniforme a lo largo del año, hasta condiciones extremas en las regiones con precipitaciones marcadamente estacionales. Incluso los brezales húmedos, con abundante agua disponible en la mayor parte del año, pueden sufrir sequía estival durante el período más seco del año. En el caso del brezal la estrategia adoptada para la gestión del agua es la de los perennifolios esclerófilos (Connor & Doley, 1981) consistente en que las plantas mantienen su capacidad fotosintética a lo largo de todo el año, pero pueden controlar las pérdidas de agua y resistir la desecación cuando el recurso es limitado. Las adaptaciones fisiológicas del matorral de ericáceas australiano han sido descritas por estos autores, indicando que aunque las tasas de fotosíntesis son generalmente más bajas que las de las especies mesofíticas (caducifolias) pueden mantener balances positivos de carbono hasta niveles altos de estrés hídrico. El crecimiento es lento y la adaptación a los ritmos estacionales se refleja en la fenología de las especies, de modo que el crecimiento vegetativo se asocia a la época de precipitaciones.

La relación de **mutualismo** entre las especies principales del matorral se sustenta en los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes esenciales para las plantas y fundamentalmente, el nitrógeno. En todo caso, la expansión de las formaciones de matorral ha contado con el imprescindible papel de otros factores bióticos, como son las micorrizas, que permiten la extracción de nutrientes en todos los hábitats (Brezales secos, Brezales húmedos y Turberas) y la especie humana.

## I.5. VALOR PAISAJÍSTICO

Uno de los aspectos más relevantes del paisaje de Galicia y que se han destacado con frecuencia en la bibliografía especializada es el valor paisajístico de los brezales. Sin embargo, dicho valor nunca ha sido ponderado, ni siquiera de manera aproximada. En este trabajo de investigación no se ha querido pasar la ocasión de abordar un estudio de estas características pues, si hay algo que de valor al paisaje por toda la geografía gallega es, precisamente el color de los componentes del matorral, de donde se deduce que la floración juega un papel central.

Existe una estrecha correspondencia entre los ciclos anuales climáticos y la fenología de las especies. Los factores ambientales que disparan la floración son fundamentalmente el fotoperíodo, la temperatura y la precipitación. Las variaciones dentro de la misma especie obedecen a factores como la altitud, latitud, temperatura y precipitación, que condicionan claramente la época de floración. Se pueden producir desplazamientos temporales debido a variaciones meteorológicas acusadas entre años, aunque todo parece indicar una mayor variación en la intensidad de las fenofases que en el momento de su ocurrencia (Arroyo, 1990).

La fenología de la floración de los brezos gallegos ha sido estudiada por Dalda (1972) en la cuenca del Mandeo (A Coruña); por Guitián *et al.* (1991) en las brañas de Santiago de Compostela y recogida por García Martínez (1991) en un trabajo de carácter más general sobre flora de Galicia. La información sobre *E. mackaiana* se ha obtenido de Flora Ibérica. Estos datos se han comparado con el entorno geográfico más próximo, básicamente con Portugal (Coutinho, 1939), País Vasco (Aizpuru *et al.*, 1999), Francia (Rol *et al.*, 1968) y Andalucía occidental (Arroyo & Herrera, 1988).

En la Tabla I.5 se recogen las épocas de floración de los brezos gallegos, según los datos de Flora Ibérica (*E. mackaiana*) y García Martínez (1991) (especies restantes), encontrándose que siempre hay alguna especie de brezo floreciendo a lo largo del año en Galicia, excepto en los meses de enero y diciembre. Sin embargo suele común percibir el adelanto de la floración de *E. australis*, si el otoño ha sido benigno.

Las especies de floración más temprana inician esta fase fenológica en los meses de invierno (*E. australis*, *E. umbellata*, *E. arborea*) y primavera (*E. ciliaris*). En el mes de mayo da comienzo la floración en 5 especies, aunque la duración de sus respectivos períodos de floración es muy distinta: Destacan *E. erigena* por poseer un breve período de floración limitado el mes de mayo en Galicia; y *E. scoparia*, que se prolonga hasta el mes de julio únicamente. En comparación, *E. cinerea*, *E. tetralix* y *D. cantabrica*, presentan períodos de floración de 5-6 meses, por lo que se prolongan hasta octubre. Ya entrado el verano se inicia la floración de *E. vagans* y *E. mackaiana*, mientras *C. vulgaris* destaca por ser el brezo de floración más tardía es *C. vulgaris*, extendiéndose por los meses de otoño.



Tabla I.5. Floración de los brezos en Galicia, según datos de Flora Ibérica (*Erica mackaiana*) y García Martínez (1991) (especies restantes).

	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	O	N	D	N
<i>Erica australis</i>													7
<i>Erica umbellata</i>													7
<i>Erica arborea</i>													4
<i>Erica ciliaris</i>													6
<i>Erica erigena</i>													1
<i>Erica scoparia</i>													3
<i>Daboecia cantabrica</i>													6
<i>Erica cinerea</i>													5
<i>Erica tetralix</i>													6
<i>Erica vagans</i>													6
<i>Erica mackaiana</i>													3
<i>Calluna vulgaris</i>													3

N= nº de meses al año en que puede estar la especie en flor.

Al cromatismo de la formación contribuye también el hecho de que algunas especies de brezos conservan las flores secas hasta mucho tiempo después de que haya pasado la época de la floración, y en algunas incluso coinciden las espigas florales viejas con las nuevas. A modo de ejemplo destacan *E. tetralix* y *E. cinerea*, mientras otras especies poseen flores más efímeras: *E. arborea*, *E. vagans*, etc.

Los meses del año en que se puede encontrar el máximo número de brezos en flor en Galicia (con nueve especies en total) son mayo a julio, coincidiendo con la época de temperaturas medias más elevadas y menor precipitación. Este hecho estaría relacionado con la polinización entomófila de una buena parte de las especies del brezal gallego, dada la menor abundancia de insectos que visitan las flores en los meses más fríos del invierno (Herrera, 1987). Las especies de este grupo tienen flores llamativas, suelen presentar los estambres encerrados en la corola y las anteras poseen unos apéndices que se mantienen en el centro de la flor, de forma que cuando un insecto llega buscando el néctar se ve obligado a apartarlas, facilitando que el polen se desprenda (Bayer & López, 1989). Ejemplos típicos de esta arquitectura floral, con corolas relativamente grandes y de colores rosados, de tonalidades variables entre rosa claro y azulado, son *E. cinerea*, *E. ciliaris*, *E. tetralix*, *E. mackaiana*, *D. cantabrica*, etc.

Las especies en las que el transporte del polen lo realiza el viento, anemófilas, como *E. scoparia*, tienen flores muy pequeñas y poco vistosas, muy abundantes y su polen suele ser de pequeño tamaño, se desprende en grandes cantidades y es capaz de recorrer largas distancias. También existen brezos con mecanismos de polinización mixtos, como *C. vulgaris* y, dada la forma acampanada similar de las flores, es posible que otros brezos como *E. arborea* o *E. australis* también posean este tipo de polinización.





## **CAPÍTULO II**

### **MATERIAL Y MÉTODOS**



Para lograr los objetivos propuestos anteriormente el presente estudio se articula atendiendo a tres escalas de trabajo que, en la secuencia propuesta, suponen un grado creciente de detalle:

- Estudio de los hábitats de los brezos de Galicia
- Estudio de suelos y plantas
- Obtención y análisis de los fitolitos

## II.1. ESTUDIO DE LOS HÁBITATS DE LOS BREZOS DE GALICIA

En la elaboración de la presente Memoria, se entiende el término hábitat en su sentido ecológico tradicional, como el lugar donde vive un organismo o donde uno esperaría encontrarlo (Odum, 1979). Concretamente, el presente trabajo se centra en los factores de formación de suelo, sobre todo litología y topografía; la elección de estos factores obedece a la importancia que posee el suelo como elemento consustancial al hábitat de la vegetación terrestre, ya que integra una cierta cantidad de información ambiental sobre la disponibilidad de recursos fundamentales para las plantas: sustrato, agua y nutrientes.

La información necesaria se ha obtenido a partir de los inventarios florísticos incluidos en Tesis Doctorales, Tesis de Licenciatura y publicaciones especializadas. Dichos inventarios contienen, además de información sobre la abundancia de las especies, otros datos sobre algunos factores de formación de suelo: topografía (pendiente, orientación, altitud) y, en algunos casos, material de partida del suelo. Como documento básico de búsqueda de asociaciones se emplearon los trabajos de Izco *et al.* (1999, 2000) sobre el esquema fitosociológico de la vegetación de Galicia (Figura II.1). Junto a éstos se han consultado también la aproximación al esquema fitosociológico de Silva-Pando (1989), el trabajo más general de Rivas-Martínez (1979) y el imprescindible estudio de Fraga Vila (1982). Entre otros aspectos de interés este último trabajo recoge un exhaustivo estudio sobre la distribución de los brezos gallegos (exceptuando *Daboecia cantabrica*).

Una vez seleccionados todos los inventarios en los que se constató la presencia de alguna de las doce especies de brezos de Galicia, se elaboró una base de datos de taxones que incorpora la información sobre altitud, orientación y pendiente, junto a la abundancia de la especie, lugar, número de inventario y caso de existir, tipo de suelo o material de partida. Para cada dato esta información del inventario se completa con el tipo de material geológico del emplazamiento, previa localización en la cartografía geológica a escala 1:50.000 (IGME) y estableciéndose las siguientes clases de litología: Rocas básicas y ultrabásicas, sedimentos, esquistos, granitos, pizarras, areniscas-cuarcitas y turberas. El clima de las áreas de distribución de los brezos gallegos es otro factor ambiental que se ha tenido en cuenta en este estudio.

El análisis de datos consiste en un tratamiento estadístico de carácter descriptivo de la distribución de las especies según material de partida del suelo (litología) y topografía (altitud, pendiente y

orientación) que, en último término, determinan la disponibilidad de recursos para las plantas. El estudio detallado de las variables disponibilidad de nutrientes (o fertilidad) y agua edáfica se basa en el cálculo para cada especie de los denominados Factor Reserva de Agua Útil (RAU) y Factor Nutrientes (FN). Ambos son valores medios que tienen en cuenta la abundancia de plantas en los diferentes tipos de suelos (y no sólo su presencia) y resultan de una relación entre la suma total de valores que aporta cada planta y el número total de plantas por especie. Se tienen en cuenta los datos de abundancia establecidos en los inventarios, asignando el valor de 0.5 para cuantificar la presencia de individuos poco abundantes, de débil cobertura (+) y el valor 0.1 para la presencia de individuos raros o aislados (r).

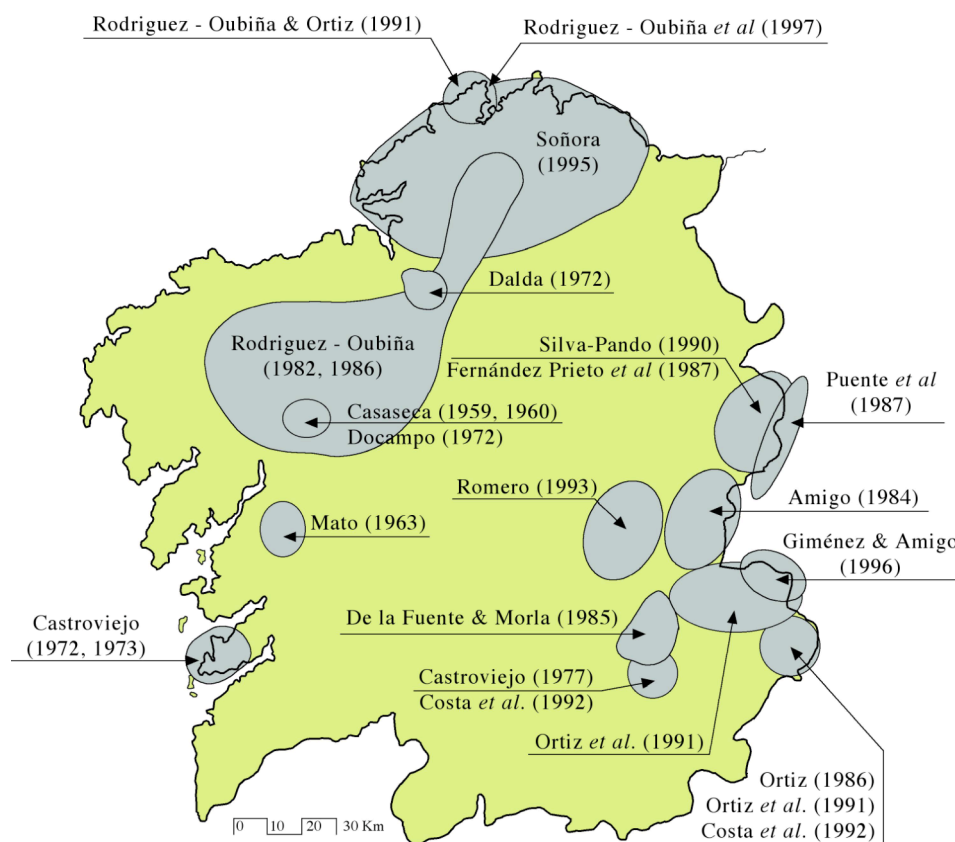


Figura II.1. Localización de las áreas de estudio donde se obtienen los inventarios empleados en el presente trabajo (A partir de Izco *et al.*, 1999).

Para realizar el cálculo del Factor Nutrientes se asigna un valor a cada litología en orden decreciente en la secuencia: Básicas y Ultrabásicas (7) > Sedimentos (6) > Esquistos (5) > Pizarras (4) > Granitos (3) > Turberas (2) > Areniscas/Cuarcitas (1). Los valores particulares obtenidos deben encontrarse entre los valores extremos de 35 (abundancia máxima en los suelos más fértiles, 5x7) y 0.1 (individuos raros o aislados sobre areniscas/cuarcitas).

Para valorar el efecto de la disponibilidad de agua edáfica sobre la presencia y distribución de especies de brezos se han tenido en cuenta los datos de reserva de agua útil total (RAUt) de los

sustratos en mm, suponiendo perfiles AR sobre todas las litologías, excepto Sedimentos y Turberas (AC). Los datos, obtenidos de Martínez Cortizas *et al.* (1999), se muestran en la Tabla II.1. A partir de estos datos se ha calculado el valor medio por especie (denominado factor reserva de agua útil FRAU) teniendo en cuenta la distribución de plantas en cada clase de suelos y su abundancia en cada inventario, de donde resulta una estima de la cantidad de agua edáfica de que dispone cada especie en promedio. Los valores particulares, teóricos y extremos serían 1.805 (=  $361 \times 5$ ) y 3.4 (=  $34 \times 0.1$ ).

Tabla II.1. Valores de Reserva de Agua Útil total (RAUt) de suelo en mm (Martínez Cortizas *et al.*, 1999)

	Sedimentos Turberas	Básicas	Pizarras	Esquistos	Granitos Cuarcitas
RAUt (mm)	361	66	61	53	34

La consideración de los datos de abundancia en lugar de la mera presencia pretende definir con mayor precisión las características principales de los hábitats que ocupan las especies en condiciones naturales. Este estudio de detalle se fundamenta en la consideración, siguiendo a Retuerto & Carballeira (1990, 1992, 2004), que si bien las plantas pueden estar presentes en muchos sitios, es de esperar que sean más abundantes en los lugares donde las condiciones ecológicas del hábitat sean adecuadas. De esta manera, la abundancia permite incluir en el análisis estadístico una cierta información sobre el grado de proximidad del inventario al óptimo ecológico

## II.2. ESTUDIO DE LOS SUELOS Y LA VEGETACIÓN

Para realizar este estudio se seleccionaron parcelas ocupadas por formaciones de matorral que mostraban un claro predominio de las especies de brezos sobre los tojos. En la Tabla II.2 se muestra la **descripción de los puntos de muestreo**: localización, geología, nomenclatura del suelo y epipedón, así como las especies de brezo muestreadas.

Tabla II.2. Localización de los brezales estudiados

Cód.	Geología	Coordenadas	Altitud (m)	Localización
S1	Serpentinita	29T 588070 4755030	664	Serra do Careón (Toques)
S2	Serpentinita	29T 583245 4750296	450	Gándara de Melide (Melide)
S3	Serpentinita	29T 587430 4754850	568	Parque eólico do Careón (Toques)
S4	Serpentinita	29T 586460 4754495	530	Serra do Careón (Toques)
S5	Serpentinita	29T 583467 4750150	445	Gándara de Melide (Melide)
S6	Serpentinita	29T 588000 4844170	425	Serra da Capelada
Gn1	Granulita	29T 586025 4840915	505	P. eólico Herbeira (A Capelada)
Gn2	Granulita	29T 585495 4841631	534	P. eólico Herbeira (A Capelada)
E1	Eclogita	29T 588715 4841307	465	Miranda (A Capelada)
E2	Eclogita	29T 588721 4841212	460	Miranda (A Capelada)
SQ1	Sedimento cuaternario	29T 486064 4781583	30	Cementerio de los ingleses (Camariñas)
SQ2	Sedimento cuaternario	29T 484780 4778405	38	Punta Forcadas (Camariñas)
Gb1	Gabro	29T 525598 4770509	530	Monte Castelo (Tordoia)
Gb2	Gabro	29T 524840 4771565	516	Monte Castelo (Tordoia)
Gb3	Gabro	29T 525540 4770542	537	Pena Cabaleira (Tordoia)
Gb4	Gabro	29T 526174 4771691	402	Brandoñas de Abaixo (Tordoia)
Gb5	Gabro	29T 525463 4771506	505	Pena Cabaleira (Tordoia)
Es1	Esquisto	29T 531800 4739500	182	A Xesteira (Ames)
A1	Anfibolita	29T 553555 4747997	320	Mina de Touro (Bama, O Pino)
A2	Anfibolita	29T 555041 4747579	345	Mina de Touro (Arinteiro, O Pino)
Gr1	Granito	29T 617720 4814150	956	Cadramón (Abadín)
Gr2	Granito	29T 601882 4816698	345	Parque eólico de Bustelo (Muras)
Gr3	Granito	29T 601859 4816699	403	Parque eólico de Bustelo (Muras)
Gr4	Granito	29T 508367 4750975	445	Campolongo (Negreira)
Gr5	Granito	29T 534573 4744360	225	Milladoiro (Ames)
Gr6	Granito	29T 534600 4744825	237	Milladoiro (Ames)
P1	Pizarra	29T 590962 4800806	612	P. eólico de Sotavento (Xermade)
P2	Pizarra	29T 601882 4826624	527	Parque eólico de Bustelo (Muras)
P3	Pizarra	29T 602298 4748721	517	Montecalvo (Monterroso)
Q1	Cuarcita	29T 616650 4812300	857	Montouto (Abadín)
Q2	Cuarcita	29T 600952 4749479	680	Monte San Simón (Monterroso)
Q3	Cuarcita	29T 585348 4739510	467	Pico Sacro (Boqueixón)
Q4	Cuarcita	29T 616650 4811700	880	Fraga de Ríobó (Muras)
SO1	Orgánico	29T 615837 4812931	937	Montouto (Abadín)



Tabla II.2. (Continuación): Suelo, epipedón y especies muestreadas en los brezales  
(IUSS, WRB; 2007)

Cód.	Suelo	Epipedón	Vegetación
S1	Phaeozem léptico	Móllico	<i>Erica vagans</i>
S2	Gleysol móllico	Móllico	<i>Calluna vulgaris</i>
S3	Leptosol móllico	Móllico	<i>Erica cinerea</i>
S4	Leptosol móllico	Móllico	<i>Calluna vulgaris, Erica cinerea, E. scoparia, E. vagans</i>
S5	Gleysol móllico	Móllico	<b><i>C. vulgaris, D. cantabrica, E. cinerea, E. scoparia E. umbellata</i></b>
S6	Leptosol móllico	Móllico	<b><i>Erica mackaiana, Erica vagans</i></b>
Gn1	Phaeozem léptico	Móllico	<i>Calluna vulgaris</i>
Gn2	Phaeozem léptico	Móllico	<i>Erica mackaiana, Erica vagans</i>
E1	Phaeozem léptico	Móllico	<i>Calluna vulgaris, Erica vagans</i>
E2	Phaeozem léptico	Móllico	<i>Calluna vulgaris, Erica mackaiana, Erica vagans</i>
SQ1	Arenosol albico	Ócrico	<i>Calluna vulgaris, Erica cinerea, Erica umbellata</i>
SQ2	Arenosol albico	Ócrico	<i>Erica ciliaris, Erica erigena</i>
Gb1	Leptosol úmbrico	Úmbrico	<i>Calluna vulgaris</i>
Gb2	Andosol aluándico	Úmbrico	<i>C. vulgaris, D. cantabrica, E. cinerea, E. umbellata</i>
Gb3	Leptosol úmbrico	Úmbrico	<i>Erica cinerea, Erica ciliaris</i>
Gb4	Tecnosol espólico gléyico	Ántrico	<i>Calluna vulgaris, Erica ciliaris, E. tetralix, E. erigena</i>
Gb5	Leptosol úmbrico	Úmbrico	<i>Erica cinerea, E. umbellata, E. australis</i>
Es1	Umbrisol cámbico	Úmbrico	<i>Calluna vulgaris, Daboecia cantabrica, E. cinerea, E. ciliaris</i>
A1	Andosol aluándico	Ócrico	<i>Calluna vulgaris, Erica cinerea, E. umbellata</i>
A2	Tecnosol espólico	Ántrico	<b><i>C. vulgaris, D. cantabrica, E. cinerea, E. umbellata, E. australis</i></b>
Gr1	Umbrisol háplico	Úmbrico	<i>Calluna vulgaris</i>
Gr2	Umbrisol léptico	Úmbrico	<i>Erica mackaiana, Erica vagans</i>
Gr3	Umbrisol léptico	Úmbrico	<i>Erica cinerea</i>
Gr4	Umbrisol léptico	Úmbrico	<i>Daboecia cantabrica, Erica cinerea, E. ciliaris</i>
Gr5	Umbrisol háplico	Úmbrico	<i>Daboecia cantabrica, Erica cinerea, E. umbellata</i>
Gr6	Umbrisol léptico	Úmbrico	<i>C. vulgaris, D. cantabrica, E. cinerea, E. umbellata</i>
P1	Gleysol úmbrico	Úmbrico	<i>Calluna vulgaris, Erica mackaiana, E. umbellata</i>
P2	Umbrisol léptico	Úmbrico	<i>Erica mackaiana</i>
P3	Umbrisol léptico	Úmbrico	<i>Erica cinerea, Erica umbellata</i>
Q1	Podzol úmbrico	Úmbrico	<i>Erica cinerea, E. ciliaris, E. mackaiana</i>
Q2	Umbrisol léptico	Úmbrico	<i>Erica cinerea, Erica umbellata</i>
Q3	Podzol albico	Úmbrico	<b><i>C. vulgaris, D. cantabrica, E. cinerea, E. ciliaris, E. umbellata</i></b>
Q4	Podzol úmbrico	Úmbrico	<b><i>Erica arborea</i></b>
SO1	Histosol sáprico	Hístico	<b><i>Calluna vulgaris, Erica mackaiana</i></b>

En negrita se señalan las plantas en las que se realizó el análisis de los fitolitos.

### II.2.1. GEOLOGÍA

Las descripciones que siguen a continuación se han tomado de las correspondientes memorias del IGME 1:200.000 y, cuando el grado de detalle del estudio así lo requería, 1:50.000.

El área de toma de muestras de suelos y vegetación se encuadra dentro de las zonas Asturoccidental-Leonesa y Centroibérica que Julivert *et al.* (1972) definieron basándose en la paleogeografía, estructura y metamorfismo. El límite entre ambas se sitúa en la falla de Viveiro, una fractura puesta de manifiesto por Parga Pondal (1967) y descrita detalladamente por Martínez Catalán (1981, 1985).

La zona Centroibérica, que se encuentra Al Oeste de la falla de Viveiro, se caracteriza por la presencia de materiales esquistosos precámbricos y sobre ellos y discordantemente, una sucesión de Paleozoico inferior prácticamente completo. En la zona de estudio, donde se localiza la zona de toma de muestras de la Serra do Xistral, aflora el Dominio del Manto de Mondoñedo-Penalba.

La zona Asturoccidental-Leonesa se localiza en el sector oriental de la falla de Viveiro y se caracteriza por el carácter transgresivo y discordante de los materiales del Ordovícico inferior y la presencia de unos complejos de rocas máficas y ultramáficas, de interés en la elaboración de la presente memoria:

- Dominio del Olla de Sapo (que comprende las áreas de muestreo de Sotavento, Bustelo y Monterroso),
- Complejo de Cabo Ortegal (A Capelada)
- Dominio Esquistoso de Galicia Central y Occidental
- Dominio del Complejo de Ordes (Macizo básico de Monte Castelo, Unidades Serra do Careón y Betanzos-Arzúa)

Los puntos de muestreo se localizan en la Figura II.2 y la descripción geológica correspondiente se describe a continuación, agrupando las muestras según los dominios en que se localizan:

Zona	Dominio /Unidad	Lugar	Litología	Muestras
ZAOL	Manto de Mondoñedo	Serra do Xistral	Cuarcita	Q1, Q4
			Granito	Gr1
			Turbera	SO1
Centroibérica	Cabo Ortegal	Serra da Capelada	Serpentinitas	S6
			Eclogitas	E1, E2
			Granulitas	Gn1, Gn2
	Ollo de Sapo	Sotavento	Pizarras	P1
		Bustelo		P2, Gr3, Gr2
		Montecalvo		P3
		Monte San Simón	Cuarcitas	Q2
	Dominio Esquistoso de Galicia Central y Occidental	Ames	Esquistos	Es1
		Campolongo	Granitos	Gr4, Gr5
		Camariñas	Sedimentos Cuaternarios	SQ1, SQ2
	Complejo de Ordes	Mina de Touro	Anfibolita	A1, A2
		Monte Castelo	Gabros	Gb1 a Gb5
		Pico Sacro	Cuarcitas	Q3
		Serra do Careón	Serpentinitas	S1 a S5

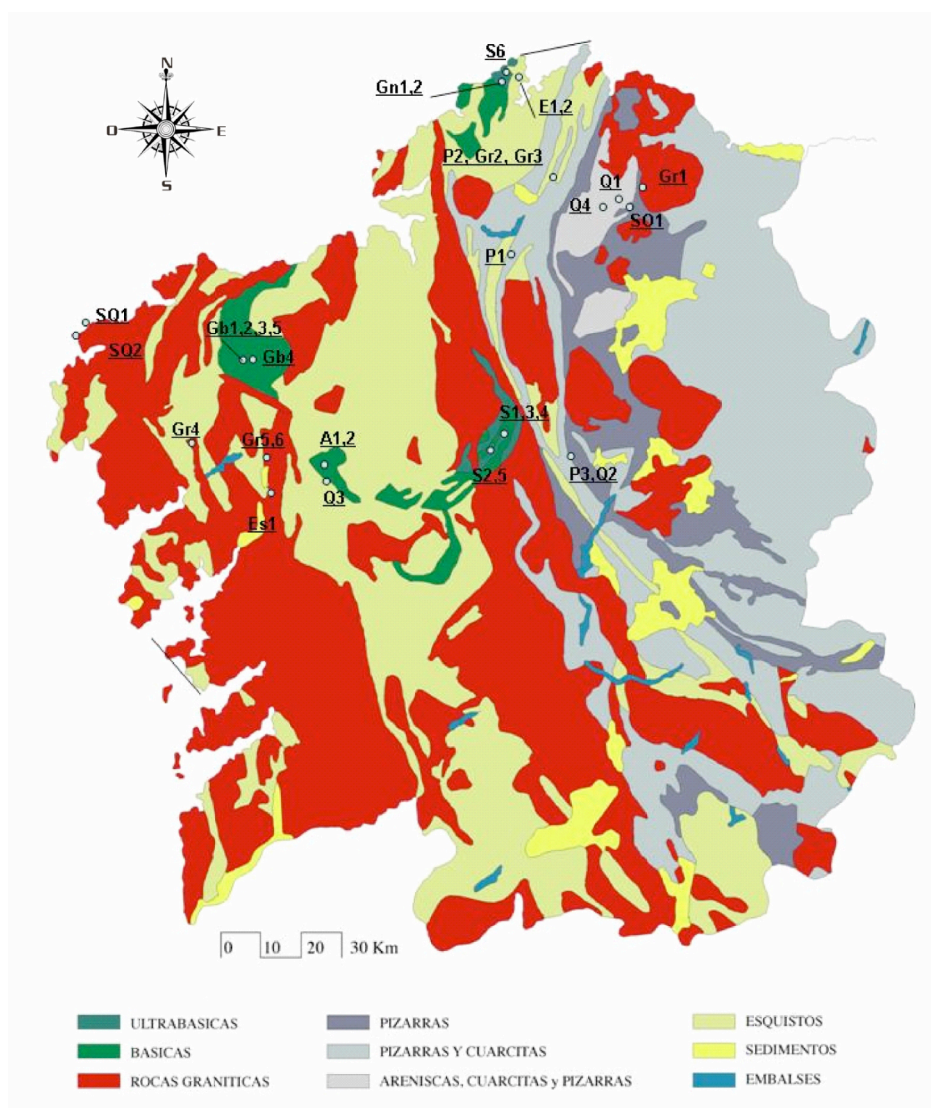


Figura II.2. Esquema Litológico de Galicia sobre el que se señalan los brezales estudiados.

## ZONA ASTUROCCIDENTAL-LEONESA

*Dominio del manto de Mondoñedo (Serra do Xistral)*

Desde el punto de vista litológico la zona de estudio incluida el Dominio del Manto de Mondoñedo está formada por cuarcitas del Cámbrico (Muestras Q1 y Q4), que forman una ancha banda con orientación general NE-SW. Por el Este de este afloramiento se encuentra una banda compuesta por esquistos y neises pelíticos de edad precámbrica (serie de Villalba) fuertemente granitizados. A ambos lados de estas dos bandas afloran materiales graníticos; en dirección E se encuentra una importante formación de rocas graníticas, la granodiorita de A Toxiza, que comprende parte de los terrenos del parque eólico Cadramón (Muestra Gr1). Recubriendo a todas las anteriores aparecen con frecuencia materiales cuaternarios de distinto origen y naturaleza, las formaciones de turberas del Xistral, entre las que cabe destacar la turbera minerotrófica del Eume (Muestra SO1). (Figura II.3). Todos estos materiales se describen a continuación por orden de antigüedad:

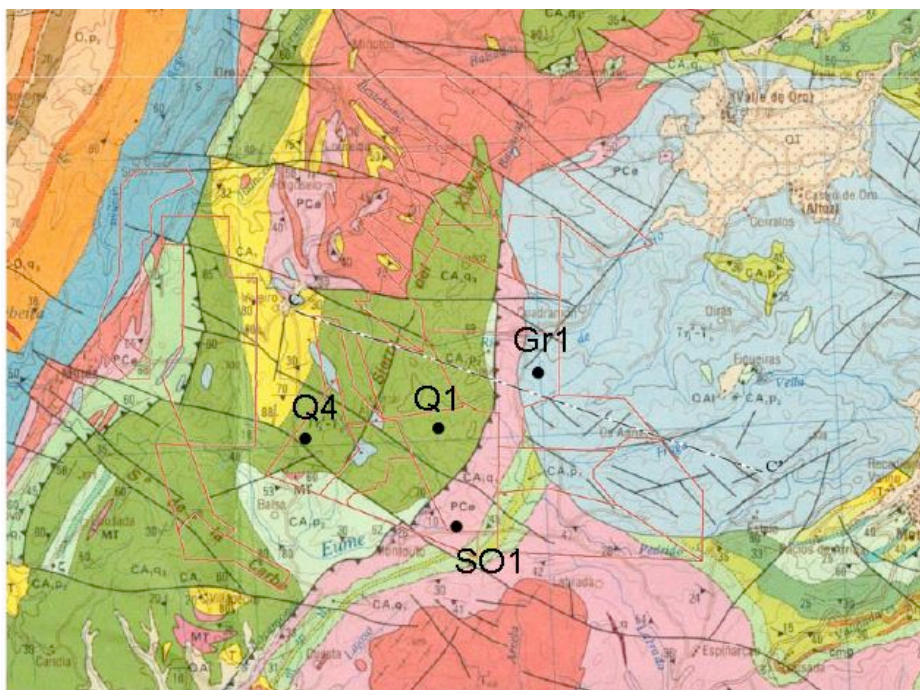


Figura II.3. Localización de las muestras de suelos y vegetación en la Serra do Xistral, sobre la turbera del Eume (T1), cuarcitas del Xistral en terrenos de los parques eólicos Montouto (Q1) y Cadramón (Q4) y sobre la granodiorita de A Toxiza (Gr1).

*Muestras Q1 (Montouto Abadín, Lugo) y Q4. Fraga do Ríobó (Muras, Lugo)*

Denominada “Ortocuarcita del Xistral” por Parga Pondal y Aleixandre (1966) o en general Cuarcita del Xistral, forma una importante unidad de potencia estimada entre los 1.000 y 2.000 m (aunque no se puede fijar debido a la inexistencia de techo). Son cuarcitas de grano grueso con algunos niveles intercalados de conglomerados de cantos de cuarzo fundamentalmente con escaso desarrollo (Bastida y col. 1984). Con respecto a estos últimos cabe destacar un afloramiento en las

proximidades del polígono del parque eólico Carba: Se trata de un lentejón de conglomerado de cantos de cuarcita (con un tamaño máximo de 7 cm) y de turmalinita, que presenta estiramiento, cementados en una matriz silicea. Es posible que este lentejón de conglomerado se halle intercalado hacia la base de la formación y que aflore debido al plegamiento de la zona donde se encuentra.

Las cuarcitas son de color blanco, amarillento o incluso rosado por impregnaciones ferruginosas. Están formadas casi exclusivamente por granos de cuarzo de origen detrítico, de contorno subangular o subredondeado. Generalmente son compactas, aunque a veces los granos de cuarzo presentan una débil cohesión, por lo que la roca, a pesar de poseer un aspecto masivo, presenta con frecuencia aspecto sacaroideo y se hacen muy deleznales, dando arenas y lajándose con facilidad. El tamaño de los granos puede llegar a ser bastante uniforme (entre 0,1 y 0,2 mm.) pero existen zonas donde puede apreciarse una estratificación por tamaños, llegando a alcanzar los clastos hasta 2 y 5 cm de diámetro. La textura es granoblástica y de tamaño de grano medio a grueso, por lo que en su mayor parte son muy heterométricas. Como accesorios más frecuentes hay biotita, moscovita, turmalina, esfena, feldespato potásico y minerales opacos en cubos.

En general esta cuarcita presenta un grado de recrystalización considerable, a veces con aspecto de cuarzo puro y otras veces con moscovita y biotita incluidas, aunque en algunos puntos parece estar migmatizada y da origen a gneises cuarcíticos con feldespato. Presenta en algunos puntos inyecciones de granito que penetran por los planos de esquistosidad.

#### *Muestra Gr1 (Cadramón, Abadín, Lugo)*

Por el E de la cuarcita de la Serra do Xistral aflora la granodiorita tardía del Macizo da Toxiza, de forma circular claramente definida. Está constituido por rocas prácticamente indeformadas que son posteriores a las principales fases de deformación hercínica, por lo que fueron afectadas únicamente por las fracturas tardihercínicas.

El macizo está formado por adamellitas biotíticas y granitos de dos micas. Su adscripción al grupo de las granodioritas tardías se hace merced a los datos petrográficos y composicionales y a la evolución tectono-estructural de los macizos graníticos del NW peninsular. Esta serie calcoalcalina, definida por Capdevila (1969) para adamellitas biotíticas en sentido estricto, presenta ligeras variaciones composicionales desde la zona occidental gallega, donde encajan bien todas sus características, a la oriental donde presentan caracteres yuxtapuestos con los granitos de dos micas.

El macizo está constituido por rocas prácticamente indeformadas, que cortan netamente las estructuras originadas en las principales fases hercinianas de deformación. Se encuentran afectadas únicamente por fallas tardías y cortan a las isogradas de metamorfismo regional, dando lugar a una aureola de metamorfismo de contacto. El contacto con los materiales precámbricos y paleozoicos del encajante es intrusivo y subvertical, pero no se observan orientaciones fluidales en los bordes, de desarrollo acusado en otras intrusiones de granodioritas tardías de Galicia, lo que confirmaba la

forma cilíndrica de la intrusión, debido probablemente a que la zona externa del presente batolito esté constituida por un granito de textura y composición ligeramente diferente. Arce y Fernández (1977) observaron un cambio mineralógico gradual hacia los bordes, pasando a facies más moscovíticas y menos biotíticas, a la vez que las plagioclasas se hacen más ácidas, pudiendo llegar a términos albiticos. En los bordes se presenta tectonizado.

Dentro del plutón se observan diferentes enclaves metamórficos, concentrados sobre todo en la parte central, de materiales arenoso–pelíticos carbonatados y neísicos del encajante en distribución irregular, afectados por efectos sobre todo térmicos, que impiden una reconstrucción siquiera parcial de la probable dirección de las estructuras. Además y de forma puntual se observa en el centro del macizo un pequeño afloramiento de granitos orbiculares con agregados de cristales de feldespato de gran tamaño (10 cm) en una matriz cuarzo - feldespática - biotítica de grano medio asimilable a la facies adamellítica.

La facies común de las granodioritas tardías es una roca que casi siempre aflora en forma de be-rrocal debido a la disyunción en bolos. Es de grano grueso, con cuarzo, megacristales de feldespato de 1 a 5 cm y grandes biotitas, dibujando cartográficamente una forma concéntrica de gran radio en el centro del plutón. La facies del borde, menos abundante, se diferencia de la anterior por presentar menor tamaño de grano (indicativo de un enfriamiento más rápido), por la presencia de moscovita y por la disminución progresiva de la biotita, siendo el paso de unas a otras gradual y de muy difícil delimitación.

Petrográficamente se trata de un granito muy homogéneo de textura granuda, hipidiomorfa a panxenomorfa, grano grueso heterogranular. La composición mineralógica es como sigue: Cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa (oligoclasa) y biotita que incluye por lo general al apatito, al circón y a los escasos opacos, junto con granate, moscovita y turmalina.

#### *Muestra SO1 (Montouto, Abadín, Lugo)*

Si bien en el Mapa Geológico (1:50.000) del IGME (1975) no aparecen señalados depósitos de turbera pertenecientes al Cuaternario, en el Mapa del Cuaternario (1:1.000.000) del ITGE (1989) se localizan en las Sierras Septentrionales de Galicia formaciones de turbera, aunque se trate de una escala demasiado grande. En realidad, el conjunto de depósitos atribuibles al Cuaternario, tiene una notable importancia en la zona de estudio, destacando por su heterogeneidad y variedad litológica y con sus correspondientes diversificaciones en función de su génesis y composición (Bastida y col., 1984). Se trata de depósitos orgánicos (turberas), suelos, material aluvial y coluvial.

El estudio y tratamiento de las formaciones edáficas existentes en los terrenos de la zona Lugar de Interés Comunitario Serra do Xistral se realizó en una serie de estudios de detalle realizados por el Departamento de Edafología e Química Agrícola a finales de los años 90. En dichos estudios se



hizo especial hincapié en la identificación y cartografía de los complejos turbófilos, permitiendo constatar la existencia de importantes depósitos de turbera de más de 1 m de espesor, siendo la turbera del Eume, la de mayor interés en este estudio:

Se trata de una turbera minerotrófica, que se ubica al oeste del Alto de Padela y en posición topográfica de fondo de valle. Posee unas dimensiones de unos 850 m de longitud y unos 250-350 m de anchura y un espesor muy superior a 1 m en la mayor parte de su superficie. En dicha turbera desembocan las aguas de dos pequeños arroyos que nacen en la ladera occidental del Alto de Fiouco, en cuyos valles se encuentran sendas turberas minerotróficas con espesores entre 0.5 y 1m.

## ZONA CENTROIBÉRICA

### *Complejo de Cabo Ortegal (Muestras de A Capelada)*

El Complejo de cabo Ortegal constituye uno de los complejos catazonales del NW de la Península (Figura II.4). La toma de muestras de suelo y vegetación se realizó en la Unidad de A Capelada, una de las tres unidades cabalgantes superpuestas que se distinguen en el Complejo. Se trata de un macizo complejo alóctono en el que se presentan rocas muy antiguas (Proterozoicas) cuyo emplazamiento parece que estuvo ligado a la orogenia Caledoniana. Las rocas presentan un carácter generalmente milonítico y un metamorfismo de alto grado en condiciones que implican un origen cercano a la base de la corteza: Está constituida por un conjunto de rocas ultramáficas (**peridotitas serpentinizadas, S6**), máficas polimetamorfizadas pertenecientes a facies de **eclogitas (E1, E2)**, **granulitas (Gn1, Gn2)** y anfibolitas y algunas rocas metamórficas de las facies de esquistos o gneises, de origen sedimentario.

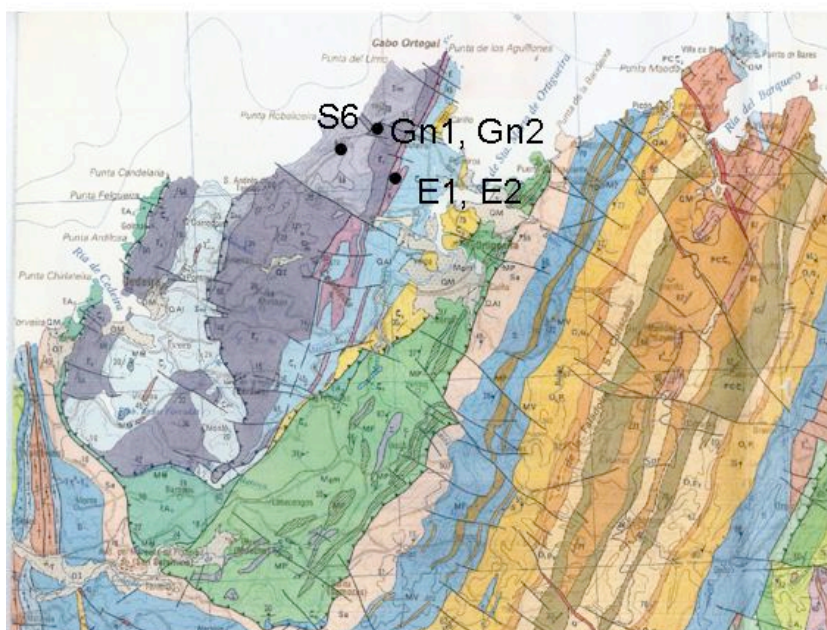


Figura II.4. Localización de las muestras de suelos y vegetación en la Serra da Capelada, sobre las rocas ultrabásicas serpentinizadas (S6), eclogitas de Miranda (E1, E2) y granulitas de Herbeira (Gn1, Gn2).

*Muestra S6 (Serra da Capelada)*

Los mayores afloramientos de rocas ultrabásicas se encuentran en Limo y Herbeira; otros afloramientos se encuentran en Uzal y en una serie de pequeños enclaves. Son fácilmente reconocibles en el campo por su pátina marrón (debido a la serpentización) y el aspecto desolado del paisaje. Todas las rocas ultrabásicas han sufrido una intensa serpentización que hace difícil el reconocimiento de sus características originales. El tipo más común es una peridotita con espinela y pargasita. La composición mineralógica más general de las peridotitas es fundamentalmente: olivino, anfíbol, clinopiroxeno, ortopiroxeno, granate y, a veces, clorita. Al microscopio se observa una estructura pseudobrechoide, donde los minerales serpentínicos (antigorita, crisotilo y lizardita) constituyen la matriz y rellenan las grietas existentes entre los componentes iniciales de las peridotitas. Presentan una laminación en bandas de 0,5 á 5 cm que se debe fundamentalmente a variaciones en el contenido de olivino y piroxeno.

*Muestras Gn1, Gn2 (Parque eólico Herbeira)*

Las rocas de facies granulita son los materiales dominantes en el emplazamiento de Cruz de Acero y Pena do Vín. En general son los materiales más abundantes en el conjunto de A Capelada. En el campo, aparecen como rocas masivas de color negro-verdoso, con granates. Se trata de rocas metamórficas cuya composición más frecuente es plagioclasa, granate, clinopiroxeno y cuarzo, producidas por un proceso de retrometamorfismo en el cual los piroxenos originales se transformaron en hornblenda. En algunas zonas se observa un proceso de migmatización, originándose grandes láminas de cuarzo y plagioclasa.

*Muestras E1 y E2 (Miranda)*

Los grandes afloramientos están formados por eclogitas con zoisita. Macroscópicamente son rocas verdes de grano medio, equigranulares y escasamente orientadas. Están constituidas en un 90% por granate y clinopiroxeno (onfacita) y el 10% restante lo constituyen cianita, cuarzo,  $\alpha$ -zoisita, apatito y rutilo. Suelen apreciarse muy bien los cristales de granate en una masa verde de clinopiroxeno.

Los análisis químicos indican que las eclogitas proceden del metamorfismo de alta P y T° de rocas magmáticas (hecho también evidenciado por su textura), que pueden ser clasificadas como toleítas sobresaturadas o toleítas con olivino.

**DOMINIO DEL OLLO DE SAPO. MUESTRAS DE PIZARRAS (SOTAVENTO, BUSTELO Y MONTERROSO)**

El Dominio del Olló de Sapo abarca un área comprendida entre la falla de Viveiro y la franja Pontedeume-Valdoviño. Constituye una ancha franja que cruza, describiendo un arco, toda Galicia hasta cerca de Zamora. Estructuralmente la formación es un anticlinal cuyo núcleo (Olló de Sapo) es de edad ante-ordovícica, atribuido al Precámbrico: Sobre el núcleo y a ambos flancos aparecen



sedimentos pelíticos y samíticos de edad Ordovícica y Silúrica. Está compuesto de rocas metamórficas de bajo grado: filitas, pizarras (muestras P1, P2 y P3), esquistos y cuarcitas (Q2); y en Dominio aparece una secuencia característica de materiales geológicos: Formación precámbrica *Ollo de Sapo*, materiales del Ordovícico inferior, pizarras de los montes y la sucesión silúrica.

#### *Muestras P1 (Parque eólico Sotavento, Xermade)*

El área de parque Sotavento se asienta sobre una amplia zona ocupada por materiales pertenecientes al Ordovícico inferior, concretamente las pizarras de los Montes, una serie de pizarras, areniscas y cuarcitas situadas entre la formación Ollo de Sapo y la Cuarcita Armoricana (esta última, también del Ordovícico inferior).

Se trata de filitas y esquistos con impregnaciones ferrosas y niveles arenosos. En su composición entran abundantes elementos micáceos, clorita, y proporción variable de cuarzo y cloritoide, granate, estaurolita. Como minerales accesorios, apatito, circón, opacos y turmalina. Además, aparecen intercalaciones de cuarcitas al sur este de la zona de estudio que presentan cuarzo como mineral dominante (más del 60 %), moscovita, feldespato potásico y plagioclasas.

#### *Muestras P2, Gr2 y Gr3 (Parque eólico Bustelo, Muras)*

Los materiales que afloran en el parque eólico Bustelo, son muy similares a los anteriormente descritos: La formación más extendida pertenece al Ordovícico Medio y Superior, que están formados por esquistos y filitas con pequeñas intercalaciones samíticas de características muy similares a las filitas, y esquistos en el tramo inferior a la cuarcita armoricana. Se componen de moscovita dominante, clorita, cuarzo, grafito, cloritoides, turmalina, circón y opacos. La presencia de intercalaciones samíticas en las muestras Gr2 y Gr3 da la apariencia de una muestra de suelo desarrollada a partir granitos, de ahí su clasificación en la Tabla II.2

#### *Muestra P3 (Montecalvo, Monterroso)*

La zona de toma de muestras comprende la serie de Pizarras de los montes, también de edad ordovícica. Está constituida por esquistos de tonalidad azulada, de grano medio - fino y con escasas intercalaciones cuarcíticas. La formación suele intercalar lentejones de hierro oolítico que, en zonas donde la concentración es apreciable (Viveiro, Ponferrada, etc.), han sido explotadas. Estos materiales presentan una foliación definida esencialmente por las micas. La composición mineralógica viene dada por cuarzo, moscovita, clorita, cloritoide, material carbonoso, y como accesorios: turmalina, apatito, circón y opacos.

*Muestra Q2 (Monte San Simón, Monterroso)*

Constituido por cuarcitas de cruciana, de hasta 100 m de potencia, que intercalan algunos niveles finos esquistosos. Aunque la potencia total es relativamente pequeña, la extensión del afloramiento del tramo es variable por estar replegado debido a la segunda fase hercínica. Proceden del metamorfismo de una arenisca silíceas. Microscópicamente constituyen un mosaico equigranular de cuarzo que origina una textura granoblástica. Como minerales accesorios presentan moscovita, turmalina, apatito, circón, óxidos de hierro y opacos.

## DOMINIO ESQUISTOSO DE GALICIA CENTRAL Y OCCIDENTAL

Corresponde aproximadamente con el definido por Parga (1960) como “Grupo de Lage” y posteriormente (1966) como “Migmatitas y granitos de Lage”. Este dominio ocupa una importante extensión superficial que, siguiendo la dirección de las estructuras hercínicas se prolonga desde la zona de estudio hacia el Sur y Sureste de Galicia llegando a alcanzar la frontera norportuguesa. Se caracteriza por la presencia de una serie metasedimentaria en gran parte migmatizada y por la abundancia de rocas graníticas hercínicas, especialmente granitos de dos micas y granitoides no homogéneos, últimos productos de la migmatización de las rocas preexistentes.

Básicamente está compuesto por una serie metasedimentaria y por ortogneises glandulares de dos micas, una asociación de rocas graníticas (**Gr4, Gr5 y Gr6**), néisicas, glandulares y esquistosas (**Es1**), que en conjunto se hallan muy tectonizadas y milonitizadas, y que posteriormente han sufrido un intenso proceso de migmatización. Incluidas en el marco geográfico del Dominio, también se describen las muestras de sedimentos cuaternarios **SQ1 y SQ2** (Figura II.5)

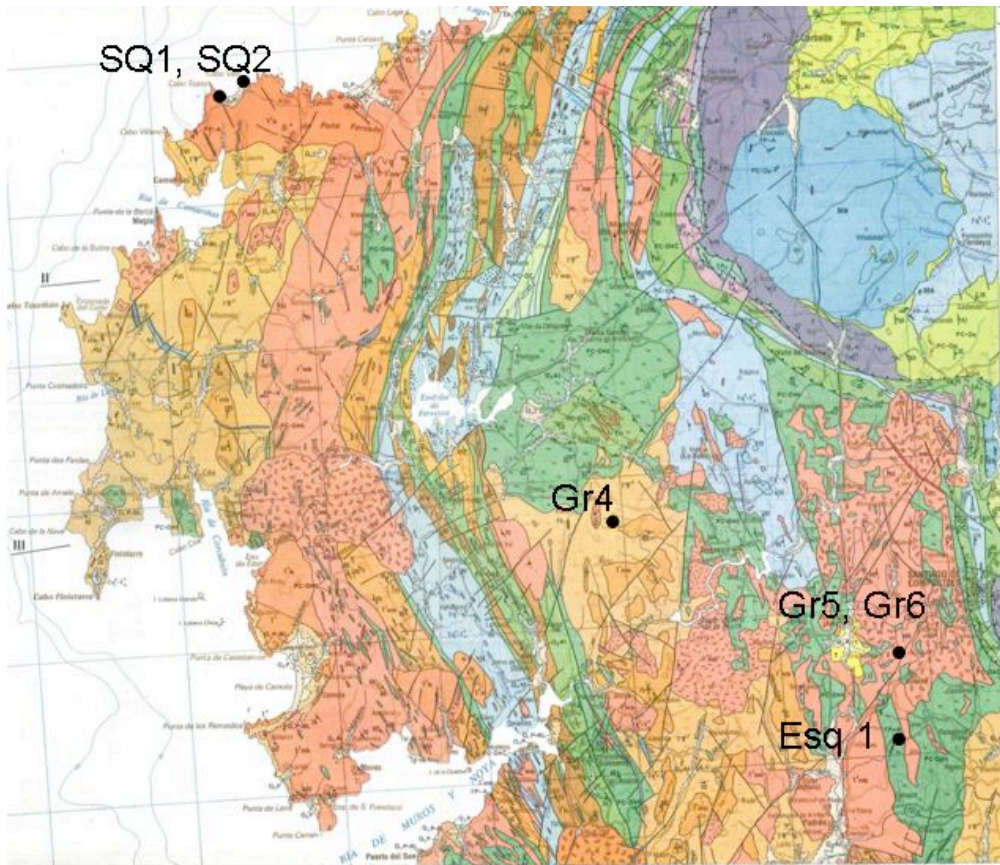


Figura II.5. Localización de las muestras de suelos y vegetación sobre materiales graníticos (Gr 4, Gr5 y Gr6), esquistos (Esg1) y sedimentos cuaternarios (SQ1 y SQ2) en el Dominio Esquistoso de Galicia Central y Occidental.

*Muestra Es1 (A Xesteira, Ames)*

El material de partida del suelo está constituido por esquistos micáceos, grafitosos y cuarcíticos. Es una unidad en contacto con materiales de naturaleza similar pertenecientes a la Unidad de Malpica-Tuy (también conocida como Complejo Antiguo, Complejo de Noia, y Fosa blastomilonítica), de la que se diferencia por tener un menor contenido de albita, alternancia con niveles cuarcíticos en los que se conservan restos de laminaciones sedimentarias y por encontrarse afectados por procesos de migmatización más o menos intensos. La edad resulta difícil de precisar por carecer de datos paleontológicos.

Los tipos petrológicos más importantes son los esquistos micáceos, cuarzo-esquistos anfibólicos, anfibolitas, rocas calcosilicatadas, esquistos grafitosos y lilitas. En conjunto se puede considerar esta unidad como la representación bajo distintos grados de metamorfismo de series políticas grauváquicas con intercalaciones subordinadas de otros tipo metasedimentarios. En las áreas catazonales se encuentran muy afectados por la migmatización y están entremezclado íntimamente con granitoides anatócticos, llegando a ser problemática su delimitación cartográfica.

La mineralogía principal consta de cuarzo, plagioclasa, biotita y moscovita. En función de la composición inicial y del grado de metamorfismo, a esta mineralogía se le pueden añadir granate,

estauroлита, andalucita, sillimanita y cordierita. Entre los minerales accesorios más frecuentes se encuentran apatito, circón, opacos, turmalina y rutilo; con carácter secundario pueden aparecer clorita, sericita y epidota. En los tipos migmatizados el feldespato potásico entra a formar parte de la mineralogía, pudiéndose llegar a la desaparición de la moscovita primaria, que reaparece con carácter tardío.

#### *Muestra Gr4 (Campolongo, Negreira)*

La zona de estudio comprende un importante cortejo de rocas metamórficas e migmatíticas, rocas que presentan características graníticas, abarcando desde las que conservan abundantes restitos, es decir, restos de estructuración del material original del que proceden, hasta las que constituyen granitos de dos micas casi homogéneos sin diferencias claras con los macizos plutónicos bien definidos.

La composición mineralógica en todas es muy semejante, siempre dentro del predominio cuarzo-feldespático. Los minerales principales son: cuarzo, microclina, plagioclasa, biotita y moscovita. Como accesorios aparecen: apatito, circón, minerales opacos y a veces, rutilos y óxidos de hierro. Los granitoides son mineralógicamente semejantes a las migmatitas, solo que estructuralmente no presentan orientación. La textura dominante en las migmatitas es granoblástica, con variaciones porfidoblásticas. Son abundantes los enclaves con restitos de la roca original, constituidos principalmente por ferromagnesianos y silicatos aluminicos, en los que se conserva la zonación principal.

#### *Muestras Gr5, Gr6 (Milladoiro, Ames)*

Los granitos de dos micas fuertemente porfídicos constituyen macizos bien delimitados cartográficamente, como plutones de tendencia circunscrita, entre los que se encuentra el de Santiago. En general se acompañan de un importante cortejo filoniano constituido por diques aplíticos, pegmatíticos, pegmatoplíticos y de cuarzo. Es frecuente observar en ellos una orientación por deformación bastante selectiva, especialmente marcada por la disposición de las micas y a veces del cuarzo y feldespato.

La composición mineralógica en el granito tipo Santiago consiste en cuarzo, plagioclasa de composición albita, oligoclasa o ambas, feldespato potásico (principalmente microclina), biotita y moscovita (que suele ser la mica más abundante). Como secundarios presenta sillimanita, apatito, circón, opacos y epidota y como accesorio, granate. De manera casi constante existe un cierto grado de moscovitización y albitización, con crecimiento de moscovita sobre feldespato potásico, plagioclasa y biotita.

*Muestras SQ1 y SQ2 (Camariñas)*

Enmarcado en el Dominio esquistoso de Galicia central y occidental, el área de muestro de los suelos de sedimentos cuaternarios de Camariñas conforma una costa recortada y accidentada en su morfología, sometida fuertemente a la acción oceánica que acentúa las características del relieve. En la zona litoral se marca la presencia de una antigua línea de costa fósil, situada a una cota de +10 á +15 m sobre el nivel del mar actual. Esta línea separa el dominio del acantilado antiguo, que ha sido remodelado por la erosión posterior, de una zona de relleno o antecosta subhorizontal correspondiente a la plataforma litoral o rasa litoral, de 50-150 m de anchura. La interacción de la erosión marina costera y terrestre, hacen que este escalón se haya convertido en ocasiones en una pendiente rocosa más o menos acentuada hacia el mar.

Sobre este sustrato la formación de depósitos cuaternarios de cierta entidad se halla prácticamente circunscrita a la red fluvial y su zona de desembocadura o acceso al mar. En la zona de estudio, la red fluvial es muy escasa y constituida por un conjunto de valles o fondos de vaguadas por los que la circulación de agua es estacional pero estructura un conjunto de depósitos.

## DOMINIO DEL COMPLEJO DE ORDES

Constituye uno de los cinco complejos de este tipo existentes en Galicia y N de Portugal, siendo lo más característico del mismo, la abundancia de rocas máficas y ultramáficas que con frecuencia han sufrido un metamorfismo catazonal. Se compone de varias unidades que presentan asociaciones litológicas con notables diferencias; son de interés para este trabajo la Unidad Serra do Careón (serpentinitas) y la denominada Unidad de Betanzos-Arzúa, que integra entre otros, las anfibolitas de la mina de Touro (Figura II.6) y el macizo básico de Monte Castelo (gabros) (Figura II.7).

*Muestras S1 á S5 (Serra do Careón, Toques y Gándara de Melide, Melide)*

La Unidad de la Serra do Careón se extiende con forma arqueada y anchura variable, por el SE del Complejo de Ordes, llegando a desaparecer localmente por causas tectónicas. Se compone casi exclusivamente de rocas ultramáficas y máficas metamorfizadas en grados bajo y medio. Forman extensas superficies continuas que coinciden con tierras baldías, y otras veces como cuerpos lenticulares de origen tectónico. Los contactos con otros tipos de rocas se caracterizan siempre por la fuerte tectonización, con desarrollo de talcoesquistos, clorititas, actinolitas y anfibolitas muy estiradas en zonas de espesor métrico a decamétrico que tienen el carácter de *melanges* tectónicas.

En la zona de recogida de muestras afloran rocas ultramáficas serpentinizadas, litotipo que agrupa rocas formadas principalmente por olivino y piroxeno, que en su mayor parte se presentan serpentinizadas. Inicialmente debieron ser rocas granudas, aunque cuando están alteradas suelen presentar una textura en malla; y de tipo dunita, wehrлита o harzburgita.

Al microscopio se aprecia la fuerte serpentización sufrida con variedades planares y fibrosas de los minerales del grupo de la serpentina, además de talco y clorita. A menudo se encuentran relictos de olivino, clinopiroxeno y ortopiroxeno, anfíboles (hornblenda incolora, cummingtonita, antofilita, tremolita y uralita)) y, como accesorios, opacos (magnetita y pirita secundaria, entre otros), espinela y carbonatos.

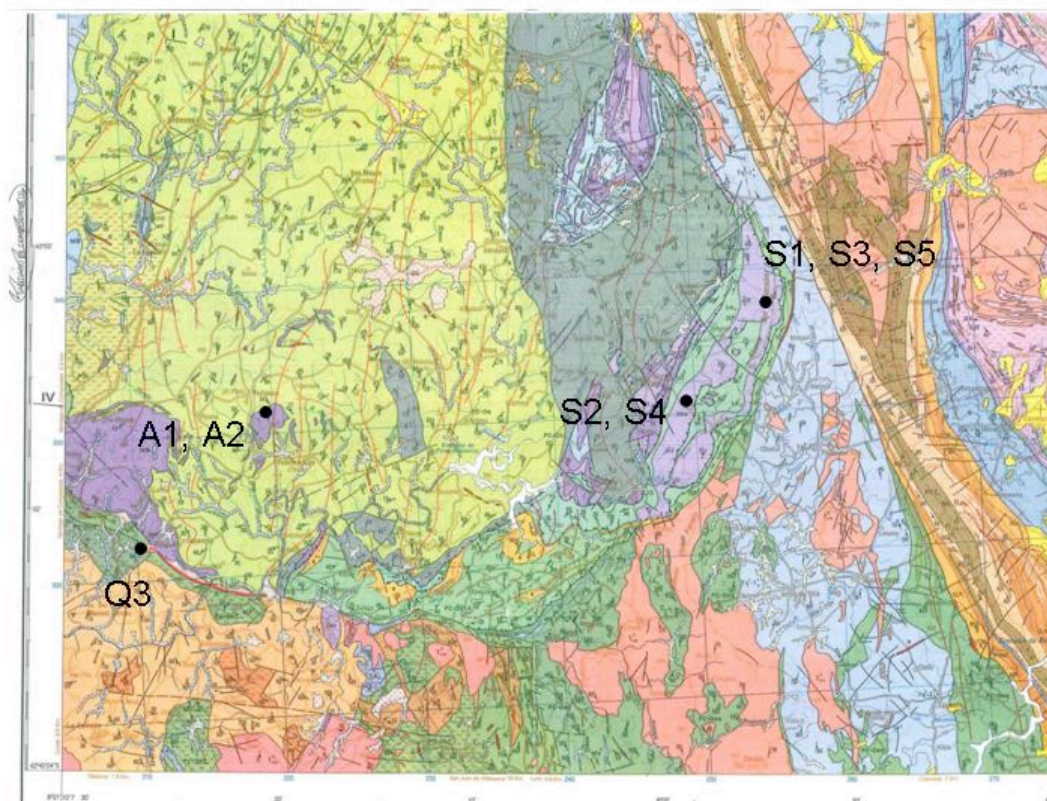


Figura II.6. Localización de las muestras de suelos y vegetación en el Dominio del Complejo de Ordes, sobre las serpentinitas de la Unidad Sierra do Careón (S1 a S5), Mina de Touro (A1, A2) y cuarcitas del Pico Sacro.

#### *Muestras A1 y A2 (Mina de Touro, O Pino)*

El área de estudio constituye un afloramiento lenticular intercalado en los Esquistos de Ordes. Se compone de metabasitas en facies anfíbolita de las que, además de un cuerpo de grandes dimensiones próximo a Santiago de Compostela, existen afloramientos que presentan una potencia media que no supera los 10 metros y que pueden corresponder a diques, sills o coladas.

En general se trata de rocas compactas, generalmente bandeadas, de color verdoso o verde oscuro y con presencia más o menos frecuente de fenocristales de anfíbol, granate o ambos. Se distinguen varios tipos, siendo las de mayor interés para la elaboración de esta Memoria las anfíbolitas en facies anfibólica, que constituye el tipo predominante: Desde el punto de vista mineralógico se componen de anfíbol y plagioclasas; entre los minerales accesorios hay cuarzo, clinozoisita, rutilo, esfena, opacos, apatito, clorita y epidota. El anfíbol suele ser muy abundante, llegando al 80%, generalmente es hornblenda verdosa aunque a veces se pueden encontrar tonalidades



verdes marrones o algunos tipos incoloros, o incoloros con bordes verdosos- La plagioclasa es oligoclasa-andesita, está poco maclada y no presenta zonación, pudiendo aparecer en agregados recrystalizados.

El yacimiento de Touro se caracteriza por la presencia de mineralizaciones masivas de piritita, pirrotina y calcopirita, incluidas como minerales accesorios en intrusiones de anfíbolitas y anfíbolitas granatíferas. Aunque su interés económico es reducido, la explotación ha estado ligada a la extracción de mineral metálico calcopirita para la obtención de cobre. El recurso de mineral metálico de los Montes de As Minas, fue explotado por la empresa “Río Tinto S.A” durante el período 1974-1988, calculándose su cubicación inicial en más de 25 millones de toneladas, con una ley de cobre que oscilaba alrededor del 0,63% (IGME, 1982). Según los datos publicados por la Consejería de Industria (1991) las reservas iniciales supuestas para estos yacimientos eran: Arinteiro:  $12 \times 10^6$  T con 0,7% de Cu y Bama:  $20 \times 10^6$  T con 0,5% de Cu. La producción de concentrado de Cu entre 1977 y 1985 fue del orden de las 40000 T pero en los años 1986 y 1987 la producción descendió considerablemente. En la actualidad, el área de mina continúa en explotación destinada a la extracción de gravas para la construcción de firmes de carreteras.

#### *Muestras Gb1 a Gb5 (Macizo de Monte Castelo, Tordoia)*

El macizo básico de Monte Castelo tiene aspecto de domo y forma subcircular, destacando en el paisaje con un resalte topográfico, sobre todo al Suroeste, donde da el punto más elevado (568 m, Monte Insua). Su diámetro es del orden de 15 Km y parece estar ligeramente alargado en dirección NW-SE, que es la dirección regional preferente.





filón se alza en la topografía como un *inselberg* alargado que culmina en el Pico Sacro (530m) coincidiendo con su terminación occidental y llega a tener un espesor de hasta 330 m.

Las vertientes de la sierra cuyo núcleo está compuesto por el filón del cuarzo están tapizadas por formaciones de coluviones. En correlación con la marcada asimetría de su perfil transversal, con las pendientes más fuertes en su vertiente septentrional, los coluviones tienen una distribución asimétrica, descendiendo más al lado N que en la ladera S. Se componen de cantos y bloques angulares y heterométricos de cuarzo procedentes del filón, dentro de una matriz limo-arenosa. Su espesor es débil y parece que no sobrepasan los 3 m.

El cuarzo de que se compone es normalmente de una gran pureza y blancura. Consta de una matriz sacaroidal de grano fino a muy fino, en que se observan partes de grano más grueso, con cuarzo en empalizada. Microscópicamente presenta una marcada textura en mortero, con cuarzoes fuertemente ondulados y dentados, indicando deformaciones postcristalinas muy intensas.

### II.2.2. CLIMA

En la mayor parte de la zona de estudio, el factor clima resulta ser bastante homogéneo entre las diferentes localizaciones (Figura II.8). Así, las muestras que se han recogido en la provincia de La Coruña corresponden a un clima caracterizado por una precipitación anual entre 1.400 y 1.800 mm y unos 12-14°C de temperatura media anual. Las excepciones a esta situación generalizada se encuentran en las sierras y en la zona costera. Así, en la Serra do Xistral, al N de la provincia de Lugo la temperatura media anual resulta ser ligeramente inferior, entre 10 y 12°C. En la línea de costa, como se aprecia en la Serra da Capelada, al NE de la provincia de A Coruña, y en la Costa da Morte, la temperatura media es ligeramente superior, pudiendo superar los 14°C .

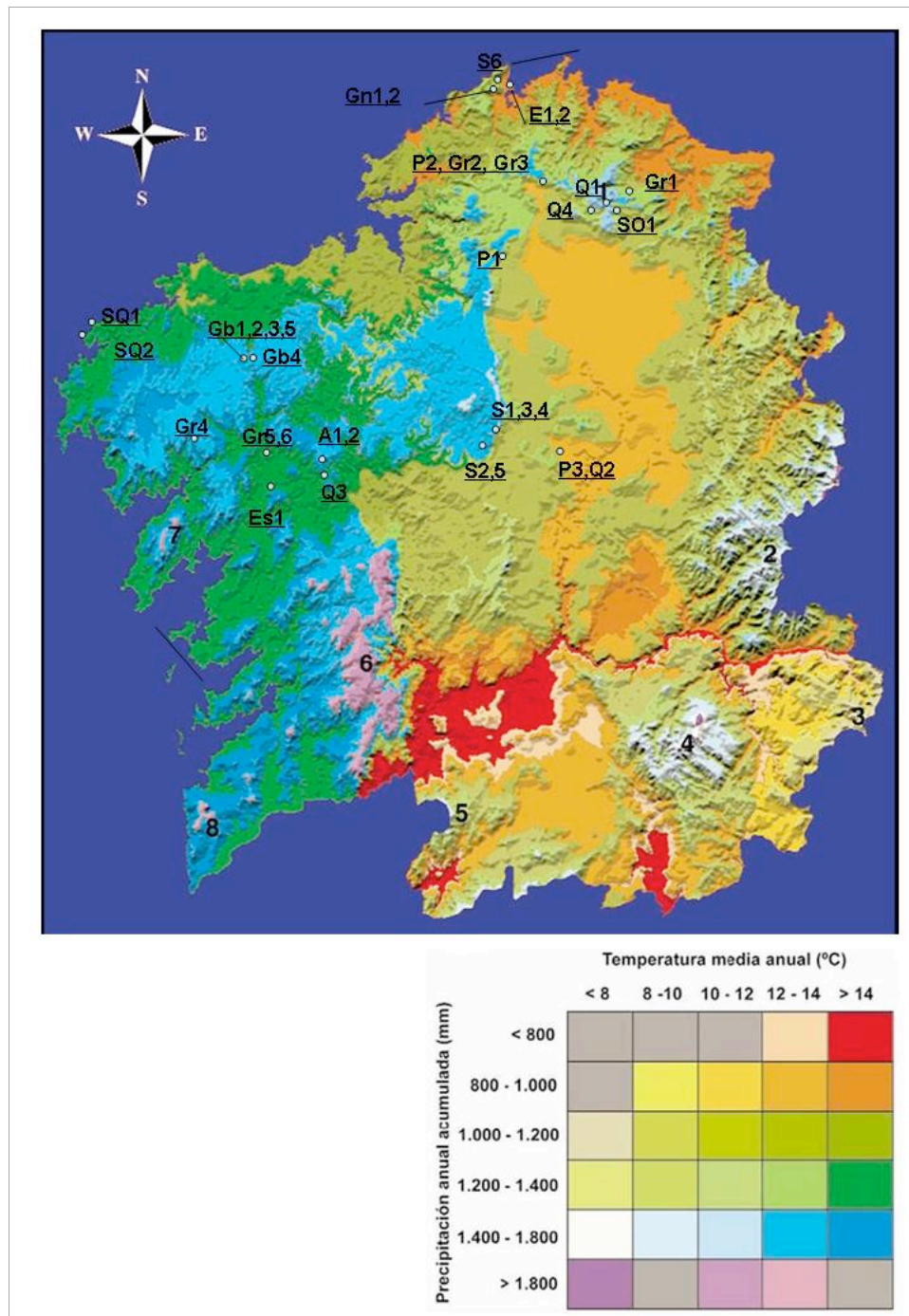


Figura II.8. Mapa ombrotérmico sobre el que se señalan los brezales objeto de este estudio. Tomado de Martínez Cortizas *et. al.* (1999).

### II.2.3. VEGETACIÓN POTENCIAL

El área de estudio se encuadra en las zonas de distribución de los robledales acidófilos colino-montano galaico-asturiano de *Blechno spicanti-Quercetum roboris* y colino galaico-portugués de *Rusco aculeati-Quercetum roboris* (Figura II.9). La degradación de estas formaciones origina las formaciones de matorral, comunidades fruticasas densas, ricas en caméfitos y nanofanerófitos. Las comunidades de matorral de Galicia se incluyen en una docena de clases fitosociológicas (Izco & Amigo, 2002) pero, no siendo posible abordar aquí un planteamiento particular de las asociaciones de matorral, se ha tratado de agruparlas y realizar una descripción sintética, siguiendo el trabajo más general de Izco (1987).

En general, dentro del mundo eurosiberiano, una gran asociación (*Ulici europaei-Ericetum cinereae*) domina los pisos colino y montano inferior de los sectores Galaico-Asturiano y Galaico-Portugués, coincidiendo con la zona de estudio considerada en la redacción de la presente Memoria: Compone prácticamente el matorral de ese territorio entre el nivel del mar y los 700-750 m como etapa de substitución de los robledales. En su composición entran *Ulex europeus*, *Ulex gallii*, *Daboecia cantabrica*, *Erica cinera*, *Calluna vulgaris*, *Agrostis curtisii*, *Halimium alyssooides*, etc. Debido a la extensión tan grande que presenta no es de extrañar su amplia variabilidad interna, por razones edáficas o climáticas.

Como islas en el seno de la gran asociación galaica colina y montana anterior, se encuentran *Cirsium filipenduli-Ericetum ciliaris* y *Ulici-gallii-Ericetum mackaiana*. La primera ocupa los suelos poco inclinados, bien desarrollados y profundos, con una cierta humedad a lo largo del año aunque sólo sea por su posición topográfica y la materia orgánica del suelo. Estas condiciones permiten el crecimiento de especies algo más exigentes como *Cirsium filipendulum* y *Erica ciliaris*, junto a algunas especies de prado: *Molinia coerulea*, *Sieglingia decumbens*, etc.

La segunda isla se asienta en el sector Galaico-Asturiano donde en medios frescos o bajo ombroclimas húmedos o hiperhúmedos se desarrollan las comunidades de la asociación *Ulici gallii-Ericetum mackaiana*, muy parecida a la anterior, pero con el endemismo *Erica mackaiana*.

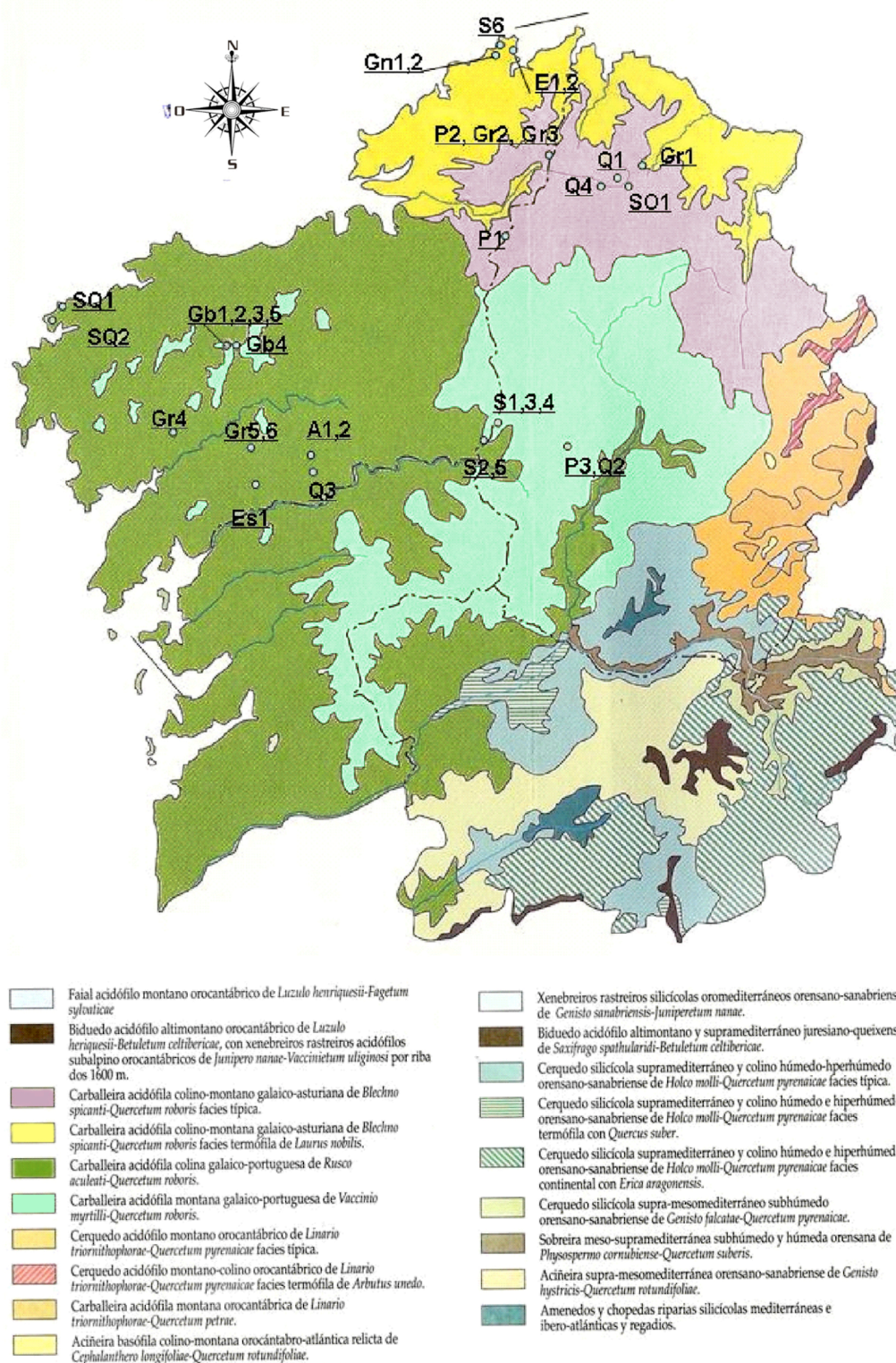


Figura II.9. Mapa de Vegetación Potencial sobre en que aparecen los brezales objeto de estudio. Elaborado a partir de Silva Pando & Regueiro (1992).

#### II.2.4. TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS

El muestreo se realizó en los meses de otoño e invierno del año 2003, completándose el estudio en los meses de mayo y junio de 2007. En los brezales seleccionados se han recogido las especies de brezo presentes junto con todo el suelo que rodea el sistema radicular de la planta. Se obtuvieron los siguientes **tipos de muestras**:

- **Muestras del horizonte superficial del suelo** en el que enraizan las plantas. En el campo se anota su espesor, así como el del perfil completo y la existencia de propiedades de diagnóstico exigibles por la taxonomía de suelos utilizada (IUSS, WRB; 2007).
- Una vez en el laboratorio se procede a separar la **rizosfera** (fina película de menos de 2 mm que rodea las raíces más finas) del **cepellón** (suelo que rodea todo el sistema radicular de la planta). Para la separación de la rizosfera se retiran las raicillas intactas y se depositan en una bandeja. Se agitan suavemente hasta conseguir que las raíces vayan hacia los bordes, quedando la rizosfera separada del resto del material, que se seca al aire para su posterior análisis (Chung & Zasoski, 1994). El resto del suelo se seca al aire y se tamiza a través de una malla de 2 mm.

En la mayor parte de los puntos existe una muestra de cepellón por cada especie de brezo, pero ha habido casos en que ha sido imposible separar el cepellón de las distintas especies presentes en el brezal y se ha obtenido una muestra de suelo compuesta para varias especies de brezo que se indica en la nomenclatura de las muestras.

- **Muestras de vegetación**, que consisten en la **biomasa aérea y radical** de las especies de brezos presentes. Las plantas recogidas se lavan en el laboratorio con abundante agua. En el caso de las raíces debido a la mayor dificultad de limpieza se utilizó previamente una disolución de EDTA 20 mM (Greger & Landberg, 1999) poniéndolas en un baño de ultrasonidos durante 30 minutos (repetiendo el procedimiento hasta que no se observen restos minerales). Todo el material se enjuaga varias veces por agua destilada y se seca a 60ª C en una estufa de aire forzado hasta peso constante (24-48 horas). Se separan flores, hojas, tallos y raíces que son finalmente pulverizados para su posterior análisis.

#### II.2.5. CODIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS

A lo largo de esta Memoria se emplea el siguiente sistema de codificación para las muestras:

1. El **primer código alfabético** que define la muestra es el correspondiente al **material de partida** del suelo que se ha muestreado:

**S**= Serpentinitas, **Gn**= Granulitas, **E**=Eclogitas, **SQ**= Sedimentos cuaternarios, **Gb**=Gabros, **Es**= Esquistos, **A**=Anfibolitas, **Gr**= Granitos; **P**= Pizarras; **Q**=Cuarcitas; y **SO**= Sedimentos orgánicos.

2. El **número** que sigue indica el **punto de muestreo** sobre cada material de partida. Así, por ejemplo, sobre serpentinitas tenemos 6 puntos del S1 al S6, respectivamente.
3. Las **letras en minúscula** se corresponden con la **especie** de brezo:

**cv**= *Calluna vulgaris*; **d**= *Daboecia cantabrica*; **cn**= *Erica cinerea*, **cl**=*Erica ciliaris*, **t**=*Erica tetralix*, **m**=*Erica mackaiana*, **e**=*Erica erigena*, **s**=*Erica scoparia*, **u**=*Erica umbellata*, **v**=*Erica vagans*, **a**=*Erica australis*, **ar**=*Erica arborea*.

#### II.2.6. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SUELOS

**Reacción actual y potencial del suelo:** pH en H<sub>2</sub>O y pH KCl 0.1 N con una relación suelo:suspensión 1:2,5 (Gutián & Carballas, 1976).

**pH en NaF:** en una suspensión de suelo con una solución saturada de NaF 1M en relación 1:50. Medida a los dos minutos (Fieldes & Perrot, 1966). Se utiliza como índice de formas de aluminio activas en el suelo.

**Carbono, Nitrógeno e Hidrógeno totales.** Para su determinación la muestra de suelo es finamente pulverizada en molino de ágata RETSCH. La medida se realiza mediante combustión por detección infrarroja (C) y termoconductimétrica (N) en un analizador elemental LECO CHN-1000 (Corp., St.Josept, MI).

**Fósforo asimilable,** mediante extracción con NaCO<sub>3</sub>H 0.5 M en una relación 1:20 (Olsen et al., 1965). El fósforo se determina por espectrofotometría visible a 880 nm por formación del complejo azul fosfomolibdico previa reducción con ácido ascórbico en un Espectrofotómetro de absorción molecular SECOMAN.

**Cationes básicos intercambiables (Ca, Mg, Na, K).** Extracción con NH<sub>4</sub>Cl 1M en una relación 1:20 (Peech *et al.*, 1947). Dado que la disolución utilizada no está tamponada, la extracción de estos cationes se realiza a un pH próximo al del suelo. La determinación se realiza por Espectrofotometría atómica de llama en un equipo Perkin Elmer 1100 B. La determinación de Ca y Mg por absorción atómica, Na y K por emisión atómica.

**Cationes ácidos intercambiables (Al y H).** Extracción con KCl 1M en una relación 1:10. (Lin & Coleman, 1960). El Al se determina por espectrofotometría de absorción atómica (EAA). En los extractos con pH inferior a 4.5 se determinó el contenido en H<sup>+</sup> intercambiables mediante titulación con NaOH 0.005N a punto final pH=4.5 en un valorador automático Crison Micrott 2022.

**Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE):** se calcula sumando los cationes básicos extraídos con NH<sub>4</sub>Cl y los cationes ácidos extraídos con KCl, este sumatorio se considera una adecuada estimación de la capacidad de cambio efectiva en suelos alterados (Gillman & Sumpter, 1985). El porcentaje de saturación de bases se calcula por medio del cociente entre la suma de los cationes básicos intercambiables y la CICE. Para el porcentaje de saturación de cada uno de los



caciones se divide el contenido del mismo por la CICE: SAl (tanto por ciento de saturación de Al en el complejo de cambio).

**Análisis total:** Determinación de **Ca, Mg, K, P, Si, Al, Fe, Ti, Cu, Ni, Cr, Mn, Zn, Pb, As, Br, Rb, Sr, Ga, Y, Zr, Nb y Th**. Las concentraciones de los elementos se obtuvieron mediante fluorescencia de rayos X de dispersión de energías utilizando dos equipo EMMA-XRF (Energy-dispersive Miniprobe Multielement Analyzer), uno para elementos ligeros con tubo de Ag y ánodo secundario de pirografito (Mg, Al, Si y P) y otro equipo con ánodo de Mo para los elementos pesados, en la Unidad de RX de la USC. El EMMA y su aplicación para análisis elemental ha sido descrito en otros trabajos (Cheburkin & Shotyk, 1996; Weiss *et al.*, 1998). La medida se realiza en la muestra de suelo molida sin necesidad de tratamiento.

**Análisis mineralógico de la fracción arcilla.** Las muestras son tratadas con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6%. Se dispersan con amoníaco y se separa la fracción <2 $\mu$  por sedimentación. El análisis mineralógico de la fracción arcilla se realizó mediante difracción de rayos X (DRX) por el método de polvo y de agregados orientados sobre una lámina de vidrio según la técnica habitual del laboratorio Mines Paris Tech (Thiry *et al.*, 1983) en un Difractómetro Phillips X'Pert dotado con rendija automática, radiación Cu K $\alpha$  y filtro de Ni y rayos X monocromáticos K $\alpha_1$ . El tratamiento de datos se realizó con el programa DIFFRACT plus EVA V8.0 (Broker AXS. INC. Estados Unidos). Las preparaciones de los minerales de arcilla se realizaron sobre las preparaciones secas al aire, saturadas en Etilen Glycol, saturadas en Hidracina y después de calentamiento a 490 °C durante 4 horas. Las muestras se analizaron además, libres de óxidos de Fe y para su eliminación se empleó el reactivo de TAM bajo lámpara de UV (Endredy, 1963). Todos los análisis mineralógicos fueron realizados en la Escuela Superior de Minas de Paris.

## II.2.7. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE PLANTAS

**Carbono, Nitrógeno e Hidrógeno.** Se determinaron por combustión en un Analizador Elemental LECO CHN-1000 (Norwald,CT).

**Ca, Mg, Na, K, P, Al, Fe, Cu, Ni, Cr, Mn, Zn, Pb y As.** Para ello se pesan 0,5g de muestra y se le añaden 9 ml de HNO<sub>3</sub> 65% (Milestone Ethos Plus, EPA 3050). El P total se determina por espectrofotometría visible en un equipo SECOMAN, As y Pb mediante espectrofotometría atómica de llama en horno de grafito (EAAHG) en un equipo Perkin Elmer (4100ZL, Norwald,CT) y los elementos restantes por espectrofotometría atómica de llama (EAA) en un equipo Perkin Elmer (1100 B, Norwald,CT), según las condiciones de medida óptimas recomendadas para cada elemento.

## ANÁLISIS DE LOS FITOLITOS

Se han extraídos fitolitos de todas las especies de brezos existentes en Galicia, con la excepción de *E. tetralix*, lo que hace una total de 11 taxones. Las plantas fueron recogidas durante los meses de mayo y junio de 2007 y 2008 en algunos de los brezales previamente estudiados, a fin de reflejar la variedad de ambientes geoquímicos en que viven estas plantas. El total de brezales analizados ha sido 8 (Tabla II.3). Sobre serpentinitas se han recogido 5 especies en el Gleysol mólico del complejo básico de Melide (S5) y 2 especies en el Leptosol mólico del complejo básico de A Capelada (S6); sobre gabros la especie *E. erigena* del Tecnosol spólico gléyico del complejo básico de Monte Castelo (Gb4); sobre anfíbolitas 5 especies en Tecnosol espólico de escombrera de la mina de Touro (A2); sobre cuarcitas se han recogido 7 especies en Podzoles de 3 localizaciones diferentes: Pico Sacro (Q3), Montouto (Q1) y Rioboo (Q4) y finalmente se han muestreado 2 especies del Histosol sáprico desarrollado a partir de sedimentos orgánicos de Montouto (SO1).

Tabla II.3. Brezales estudiados para cenizas y fitolitos

	S	Gb	A	Q	SO
<i>Calluna vulgaris</i>	S5	—	A2	Q3	SO1
<i>Daboecia cantabrica</i>	S5	—	A2	Q3	—
<i>Erica cinerea</i>	S5	—	A2	Q3	—
<i>E. ciliaris</i>	—	—	—	Q3	—
<i>E. mackaiana</i>	S6	—	—	Q1	SO1
<i>E. erigena</i>	—	Gb4	—	—	—
<i>E. scoparia</i>	S5	—	---	---	—
<i>E. umbellata</i>	S5	—	A2	Q3	—
<i>E. vagans</i>	S6	—	—	—	—
<i>E. australis</i>	—	—	A2	—	—
<i>E. arborea</i>	—	—	—	Q4	—

S=Serpentinitas; Gb= Gabros; A=Anfibolitas; Q=Cuarcitas; S=Sedimentos orgánicos.

En cada punto de muestreo se recogieron 3 individuos de cada especie con los que se hace una muestra compuesta que se procesa en el laboratorio siguiendo el procedimiento descrito para la vegetación, con la salvedad que en este caso las plantas se lavan con detergente (solución tensioactiva comercial). Una vez secas las plantas se separan las flores, hojas y los tallos, obteniendo un total de 372 muestras para calcular el porcentaje de cenizas y fitolitos de las que 33 corresponden a flores, 108 a hojas, 134 a tallos y 97 a raíces. Debido a que las plantas son recogidas fuera de su época de floración, las muestras de flores son escasas.



## SEPARACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LOS FITOLITOS

La separación de la sílice opalina se realiza tomando como referencia el método de acenización en seco (Parr *et al.*, 2001), pero optimizando la temperatura de calcinación a 600° C y su cuantificación se realiza por simple pesada (gravimetría clásica).

Para la puesta a punto del método se hicieron ensayos preliminares variando las temperaturas de calcinación. Así, se partió de una temperatura de 420° C, empleada por Carnelli *et al.* (2001) para hojas y tallos jóvenes de *Calluna vulgaris*. Se hicieron ensayos a 420, 500, 550 y 600° C y se comprobó que 500° C eran suficientes en el caso de las hojas, pero no para todos los tallos y raíces. Morikawa & Saigusa (2004) calcinan *Vaccinium corymbosus* a 550° C para análisis microscópico y elemental. En el presente estudio se optó por calcinar todo el material a 600° C, porque esta temperatura aseguró una buena acenización en todas las muestras y las menores desviaciones estándar entre réplicas, obteniendo resultados óptimos tanto para la observación de las silicificaciones por microscopía como para el análisis elemental de los fitolitos (EMMA-XRF y microanálisis de rayos X en SEM).

Para comprobar que la puesta a punto del método era la adecuada también se ha analizado a modo de control una muestra de *Equisetum arvense* procedente de Montealegre (Castro Urdiales, Cantabria), especie elegida por ser una referencia conocida. Las concentraciones medias de 3 determinaciones de cenizas ( $26.61 \pm 0.15\%$ ) y de fitolitos ( $12.38 \pm 0.42\%$ ) están dentro de los valores de referencia (Ma & Takahashi, 2002).

Todas las muestras (flor, hoja, tallo o raíz) de cada especie de brezo en cada punto de muestreo se procesan en un número de réplicas que varía entre 3 y 10. Para ello se parte aproximadamente de 1 g de material vegetal que se coloca en un crisol y se seca en estufa a 105° C durante 12 horas (hasta peso constante). Se obtiene así el peso seco a 105° C. El material se aceniza durante 6-12 horas a 600° C en una mufla, tiempo que va en función de la dificultad del material a calcinar (en hojas 6 horas son suficientes).

Una vez calcinadas las muestras se dejan enfriar dentro de la mufla, se pasan al desecador y se luego se pesan. Por diferencia a 105° C se calcula el contenido en cenizas. En las cenizas se procede a realizar la extracción de la sílice opalina, eliminando los carbonatos y los orgánicos remanentes con HCl y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Para ello, se añaden 10 ml de HCl al 10% y se deja que actúe 1 hora. Se calienta en placa calefactora hasta 60-70° C y se añaden 10 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 15% hasta que cese la reacción y se aclare el extracto (si es necesario se repite el proceso).

Se pasa el material a tubos de centrifuga de polipropileno y se lava el residuo con agua destilada centrifugando a 3000 r.p.m. durante 5 minutos, desechando el sobrenadante con una pipeta Pasteur de plástico (esta operación se repite 3 veces). El residuo se seca en la estufa durante 24 horas a 105° C y se pesa. En cada muestra se calculó el contenido de fitolitos en relación con la materia seca según la siguiente ecuación:

$$\text{Contenido de fitolitos (\%)} = (\text{peso final a } 600^{\circ} \text{ C} / \text{peso inicial a } 105^{\circ} \text{ C}) * 100$$

## ANÁLISIS ELEMENTAL DE LOS FITOLITOS

El estudio de la composición elemental de los fitolitos se centra en *C. vulgaris* por ser el brezo más ubicuista en Galicia y el mejor adaptado a todo tipo de suelos. Para ello se obtiene una muestra compuesta de fitolitos foliares de esta especie procedente de los 4 brezales donde está presente (Tabla II.3). Éstos presentan un gradiente geoquímico que parte de un Histosol sáprico (**SO1**) en una turbera minerotrófica en Montouto (Serra do Xistral, NE Lugo), un Podzol álbico (**Q3**) sobre cuarcitas en el Pico Sacro (Boqueixón, A Coruña), un Gleysol móllico (**S5**) sobre Serpentinitas del Complejo básico de Melide (A Coruña) y un Tecnosol espólico (**A2**) sobre anfíbolitas ricas en mineralizaciones de sulfuros, situado en la escombrera de la antigua mina de Cu de Touro (O Pino, A Coruña).

En estas muestras se estudia la morfología de las silicificaciones por medio de microscopía electrónica, se elaboran mapas de distribución de los elementos químicos constituyentes, y se aborda la cuantificación elemental. El análisis elemental se realizó por Fluorescencia de Rayos X (EMMA-XRF) y por Microscopía electrónica de Barrido con Emisión de Campo ULTRA PLUS FESEM (Carl Zeiss SMT, Oberdochen, Germany) con Microanálisis (INCA-x-act, Oxford Instruments). Finalmente, se han podido relacionar tanto la capacidad de producción de fitolitos como su composición elemental con las propiedades de los suelos donde se desarrollan las plantas.

El procedimiento de obtención de sílice opalina es similar al anteriormente descrito, pero en este caso hay que procesar una mayor cantidad de muestra porque es necesario obtener un mínimo de 0.5 g de fitolito para su análisis por FRX. Para ello se parte de aproximadamente 1 kg de hojas que son calcinadas en varias cápsulas y con las que finalmente se hará una sola muestra compuesta para cada punto de muestreo y aunque se sigue el protocolo anteriormente descrito, al incrementar las cantidades hay que prestar especial atención al lavado final de los fitolitos.

La **cuantificación de elementos químicos** que forman parte de la composición de los fitolitos se realizó mediante fluorescencia de rayos X de dispersión de energías EMMA-XRF (Energy-dispersive Miniprobe Multielement Analyzer) utilizando dos equipos, uno para elementos ligeros con tubo de Ag y ánodo secundario de pirografito (**Mg, Al y Si**) y otro con ánodo de Mo para elementos pesados (**Ca, K, Fe, Cu, Ni, Cr, Mn, Zn, Pb y As**).

Se realizaron mapas de distribución de elementos químicos de los fitolitos en un Microscopio Electrónico de Barrido con Emisión de Campo ULTRA PLUS FESEM (Carl Zeiss SMT, Oberdochen, Germany) con Microanálisis (INCA-x-act, Oxford Instruments) que permitieron la observación de la distribución de **Si, O, C, Al, Ca, Mg, Fe, K, Na, S, Mn, Cu**. Para ello las muestras se preparan sobre un disco de grafito y son observadas operando al vacío. Los análisis se realizan en las siguientes condiciones: entre 250 y 3000 aumentos, 2.37 A de saturación del filamento, corriente 461 pA, voltaje de aceleración de 20 kV, distancia de trabajo de 8.5 mm y un detector de rayos X. También se observa y fotografía la superficie de los fitolitos obteniéndose imágenes entre 250 y 3000 aumentos por medio de un detector de electrones retrodispersados (AsB).

### II.2.8. MÉTODOS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los análisis estadísticos se han realizado empleando el *software* SPSS 15.0. Por un lado se realizaron estudios descriptivos para caracterizar el comportamiento de los parámetros estudiados y por otro, se establecieron las posibles relaciones entre los elementos caracterizados en suelo y planta mediante el empleo de matrices de correlación y análisis de varianza factorial con test Tukey B para el establecimiento de grupos homogéneos.

Los resultados de cenizas y fitolitos se someten a una ANOVA en base logarítmica para normalizar las distribuciones aplicando el test Tukey con DSH (diferencias mínimas significativas) para el establecimiento de los grupos homogéneos y se realizan también matrices de correlación para el establecimiento de las relaciones suelo-planta entre el análisis elemental de fitolitos, hojas y suelos.

Los resultados analíticos de los suelos de brezal se someten a un análisis estadístico exploratorio previo aplicando un análisis de Jerarquización o Clúster, para ver cómo se agrupan las muestras de los 34 brezales estudiados, tomando como variables sus propiedades químicas determinadas en el laboratorio.

Para el conjunto de todos los elementos y propiedades de los suelos analizadas e ha realizado un análisis factorial de componentes principales con el objetivo de identificar la estructura de su varianza. Se trata de reducir la dimensionalidad de un conjunto de variables interrelacionadas entre sí (propiedades del suelo en este caso) a un número menor de componentes principales. Cada componente principal viene definido por un conjunto de variables que covarían, y una vez que se consigue identificar la causa que subyace a dicha variación (o factor), cada componente principal se puede asociar a dicho factor.





## CAPÍTULO III

### HÁBITATS



### III.1. INTRODUCCIÓN

Galicia cuenta con 12 especies de brezos y 4 de tojos que, formando el ecosistema matorral, se reparten el territorio de Galicia ocupando distintos hábitats y de acuerdo con los requerimientos particulares de sus nichos ecológicos. Se entiende el término hábitat en su sentido ecológico tradicional, como el lugar donde vive un organismo o donde uno esperaría encontrarlo (Odum, 1979). Por otro lado, el nicho ecológico de una especie cualquiera viene determinado por el conjunto de factores bióticos y abióticos que afectan a su pervivencia; los nichos ecológicos de especies de una misma asociación o comunidad vegetal y de un mismo género deben solaparse lo menos posible a fin de que puedan utilizar un mismo territorio e incluso un mismo tipo de hábitat sin competir entre ellas por los recursos que les ofrece el medio, básicamente sustrato, nutrientes, humedad y luz. En otros términos, esto significa que las especies de brezos que comparten un mismo territorio (*simpátridas*) e incluso un mismo hábitat o lugar habitual, deben diferir en al menos uno de los muchos factores bióticos y abióticos que componen su nicho ecológico.

Galicia ofrece una oportunidad excepcional para abordar un estudio de estas características, en primer lugar porque la diversidad de especies de brezos es de las más elevadas de Europa, fundamentalmente por el hecho de constituir frontera entre las Regiones biogeográficas Eurosiberiana y Mediterránea. La elevada diversidad de especies de un mismo género (*Erica*) que alberga un territorio tan variado como es Galicia en cuanto a clima, litología y topografía, debe obedecer a la selección que las condiciones de los hábitats han ejercido en las especies de brezos y a las que éstas han respondido con tanto éxito, éxito que se refleja tanto en diversidad de comunidades vegetales en que se encuentran como en superficie que ocupan (Figura III. 1)

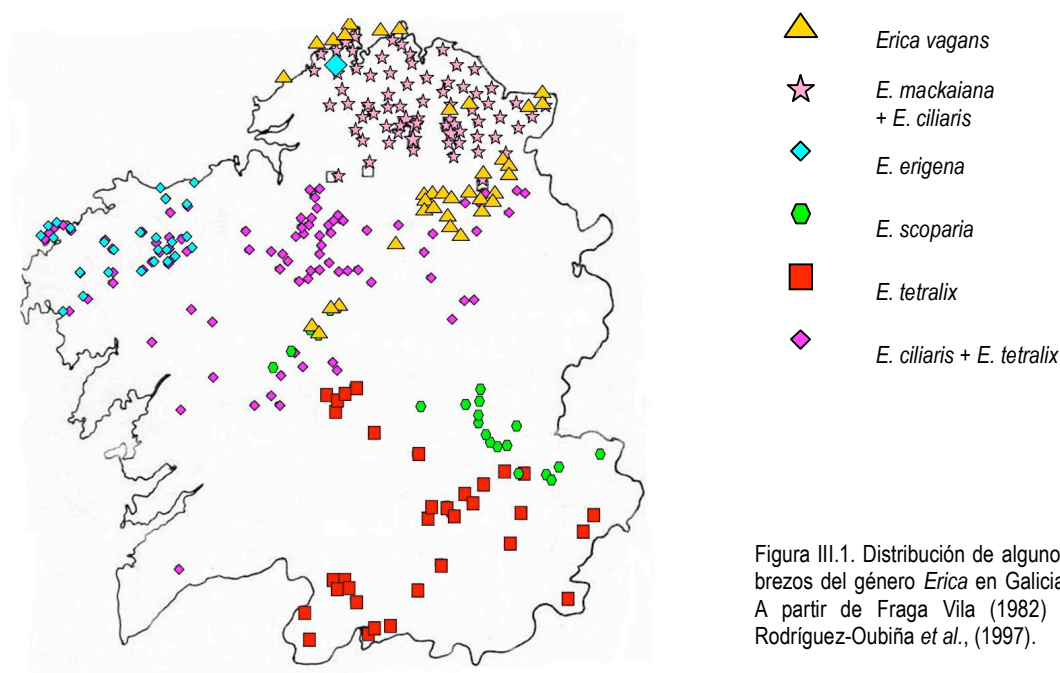


Figura III.1. Distribución de algunos brezos del género *Erica* en Galicia. A partir de Fraga Vila (1982) y Rodríguez-Oubiña *et al.*, (1997).

Las dimensiones de las áreas de distribución de los brezos, tanto a nivel europeo (comentadas en la Introducción, Figuras 1.2 á 1.5) como en Galicia aportan cierta información sobre la amplitud de la valencia ecológica de las especies, entendida como su capacidad para existir y mantener poblaciones viables en medios diferentes, por ejemplo, con distinto clima o material de partida del suelo. Según las dimensiones relativas de sus respectivas áreas de distribución entre las 12 especies de brezos de Galicia, se pueden diferenciar dos grandes grupos:

Uno de ellos está constituido por las especies que presentan áreas de distribución muy reducidas. Se trata de *Erica mackaiana*, *E. scoparia*, *E. vagans* y *E. erigena*. La representación cartográfica de las respectivas áreas de distribución permite reconocer una evidente diferenciación entre las especies de distribución cantábrica *E. vagans* y *E. mackaiana*, atlántica (*E. erigena*) y mediterránea (*E. scoparia*), que podría ser *a priori* el resultado de diferentes exigencias de las especies en cuanto a requerimientos climáticos por ejemplo, precipitación. Por otro lado, se aprecia una cierta influencia del tipo de sustrato, al coincidir a grandes rasgos las áreas de distribución de estas especies con afloramientos de rocas básicas o ultrabásicas presentes en A Capelada (*E. erigena*, *E. vagans*), Melide (*E. vagans*, *E. scoparia*), Carballo y Santa Comba (*E. erigena*) (Rodríguez-Oubiña. y Ortiz, 1991; Rodríguez-Oubiña *et al.*, 1997; Fraga Vila, 1982).

El segundo grupo de brezos incluye las ocho especies restantes, que se distribuyen por prácticamente todo el territorio de la Comunidad Autónoma, resultando aparentemente indiferentes a las condiciones de clima regional, sustrato geológico o ambos, no ya en Galicia (*Erica cinerea*, *Daboecia cantabrica*), sino en sus áreas de distribución europea (*Calluna vulgaris*, *Erica tetralix*) o mediterránea (*Erica arborea*). Junto a las ya mencionadas, también se encuentran dispersas por una gran parte de Galicia *Erica ciliaris*, *E. umbellata* y *E. australis*.

Dentro de este segundo grupo de brezos, calificados como ubicuos por sus mayores áreas de distribución en Galicia, cabe destacado el subgrupo formado por *Erica mackaiana*, *E. ciliaris* y *E. tetralix*, que muestran preferencia por sustratos con un cierto grado de hidromorfía. Las dos últimas referidas son muy comunes en las brañas y terrenos higroturbosos de Galicia (Fraga Vila, 1982, Rodríguez Oubiña, 1982, 1987), con las particulares preferencias de hábitat señaladas por Docampo Álvarez (1972). En el N de las provincias de A Coruña y Lugo, *Erica tetralix* es sustituida por *E. mackaiana*, tanto en las formaciones de brezal húmedo como en distintos tipos de turberas que definen otros hábitats prioritarios (Fraga Vila, 1982; Fraga Vila *et al.*, 2001). *Erica ciliaris* es frecuente en el Norte, centro y Este de Galicia, siendo mucho más escasa en el Sureste (Fraga Vila, 1982); está prácticamente ausente en el Sur de Galicia, de modo que en la denominada Olla de Orense, de clima mediterráneo, *E. tetralix* constituye el único brezo característico de las brañas de esta área.

Considerados en conjunto, se aprecia una distribución latitudinal de tres brezos de las brañas que refleja el gradiente climático N-S de Galicia y así, *E. mackaiana* se encuentra limitada a la zona Norte de Galicia, que se caracteriza por sus elevadas precipitaciones, temperaturas suaves y menor contraste térmico (Martínez Cortizas *et al.*, 1999a). Su área de distribución se solapa con la de *E. ciliaris*, pero éste ocupa necesariamente un tipo de hábitat diferente, concretamente, taludes húmedos y terrenos higroturbosos de toda Galicia, desde las orillas del mar hasta los montes más elevados (Fraga Vila, 1982). Por otro lado, cabe



destacar la ausencia de *E. ciliaris* en los inventarios más meridionales, lo que apunta a la existencia de una diferenciación climática o mejor, edafoclimática, importante con respecto a *E. tetralix* (la única especie de brezo hidrófila en el SE). Las preferencias por distintos niveles de humedad edáfica en estas dos especies ya fueron puestas de relieve por Docampo Álvarez (1972) a escala local (véase más adelante) y, al parecer, influyen en la distribución de las dos especies a escala regional, de modo que la distribución de *E. ciliaris* podría estar limitada por su menor capacidad de soportar los períodos de sequía estival más prolongados del Sur de Galicia y su menor aptitud para competir en sustratos encharcados, en comparación con *E. tetralix*.

El sector suroccidental de Galicia, que coincide con la provincia de Pontevedra, destaca por la aparente ausencia de estas plantas propias de sustratos hidromorfos y únicamente en las sierras litorales más meridionales, con precipitaciones a escala local suficientes para sostener formaciones de turberas (Pontevedra, 2002), se ha detectado la presencia puntual de *E. ciliaris* y *E. tetralix* (Fraga Vila, 1982).

En definitiva, como grupo, los brezos ocupan en Galicia una cierta variedad de hábitats muy diferentes entre sí en lo que se refiere tanto a las condiciones climáticas como a la disponibilidad de recursos procedentes del sustrato geológico (agua y sales minerales) o de la atmósfera (CO<sub>2</sub> y agua de precipitación), a meso y microescala. Parece pues necesario conocer el grado de influencia de algunos factores ambientales en la definición y delimitación de los hábitats particulares de cada especie de brezo, en particular aquellos que contribuyan a explicar las relaciones suelo planta. Por este motivo, se ha prestado especial atención a los factores de formación de suelo, clima y sobre todo litología y topografía. La elección de estos factores ambientales obedece a la importancia que posee el suelo como elemento consustancial al hábitat de la vegetación terrestre, ya que determina la disponibilidad de recursos fundamentales para las plantas: agua y nutrientes.

Esto permitirá en primer lugar, identificar las exigencias ecológicas de los hábitats y de las especies, en el sentido dado por la Comisión Europea (2000) en el documento gestión de Espacios Natura 2000, referido a la interpretación del artículo 6 de la Directiva Hábitats. Según el citado documento, el concepto de exigencias ecológicas incluye todas las necesidades ecológicas de factores bióticos y abióticos para garantizar el estado de conservación favorable de los tipos de hábitats y especies, incluidas sus relaciones con entorno (aire, agua, suelo, vegetación, etc.) y en segundo lugar facilitará la delimitación de las condiciones ambientales de los óptimos ecológicos para cada especie a efectos de conservación.

La información para realizar este estudio se extrajo de los inventarios botánicos contenidos en Tesis Doctorales y en la bibliografía especializada. Estos trabajos constituyen una fuente de información excepcional pues a modo de registro, incluyen información sobre la composición de los brezales y otras variables físicas de interés de forma novedosa ha sido utilizada con un enfoque ecológico. La metodología seguida se describe en el Capítulo de Material y Métodos.

## III.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### III.2.1. FRECUENCIA DE ESPECIES

En los inventarios utilizados para la elaboración de este estudio se han contabilizado un total de 3226 plantas pertenecientes a las 12 especies. Los brezos más frecuentes han sido *Erica cinerea* y *Calluna vulgaris*, con casi algo más del 18% (Figura III.2), seguidas de *E. arborea*, *Daboecia cantabrica* y *E. umbellata* (10-12%). Los brezos de las brañas *E. tetralix* y *E. ciliaris*, junto a *E. australis*, constituyen entre el 6 y 8 % de los datos considerados, mientras *E. mackaiana* alcanza apenas el 4%. Las restantes especies (*E. scoparia*, *E. vagans* y *E. erigena*) resultan minoritarias pues no llegan al 2% del total, en concordancia con sus pequeñas áreas de distribución.

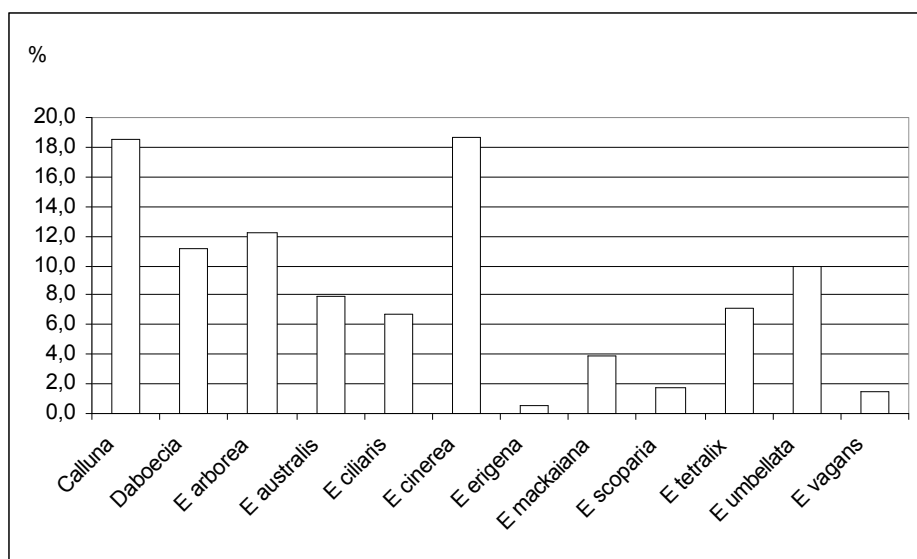


Figura III.2. Proporción de plantas de cada especie en los inventarios (N= 3226).

### III.2.2. CLIMA

El estudio de las dimensiones y localización de las áreas de distribución de los brezos gallegos ha puesto de relieve la existencia de dos series Norte-Sur, una compuesta por las especies que se asocian a los sustratos básicos (*E. vagans*, *E. erigena*) y *E. scoparia* y la segunda constituida por los brezos hidrófilos (*E. mackaiana*, *E. ciliaris* y *E. tetralix*). En relación con el factor clima, ambas secuencias se corresponden con una disminución de las precipitaciones y aumentos de las temperaturas, de la amplitud térmica media y del periodo de sequía estival, en definitiva, de mayor xericidad (Martínez Cortizas *et al.*, 1999a), tal y como se muestra en la Figura III.3.

Así, entre los brezos que componen la primera serie destaca *E. erigena* porque se localiza mayoritariamente en una zona al NW de Galicia con elevadas precipitaciones (1.400-1.800 mm) en comparación con el área de *E. vagans* (800-1.000 mm) y sobre todo, con *E. scoparia* en sus localizaciones del valle del Sil (< 800 mm), en clara consonancia con su carácter eminentemente mediterráneo. En la serie de brezos hidrófilos, el hecho de que en *Erica tetralix* coincidan una localización en la zona mediterránea de la Comunidad Autónoma (SE en Galicia, con inferiores precipitaciones que en el área de distribución de *E.*

*mackaiana*) y sus preferencias por un sustrato con un mínimo grado de hidromorfía, induce a pensar que las condiciones edafoclimáticas pueden jugar un papel más determinante en la distribución de estas especies hidrófilas que el clima de la región, aunque cabe referir que ambos factores están directamente relacionados entre sí.

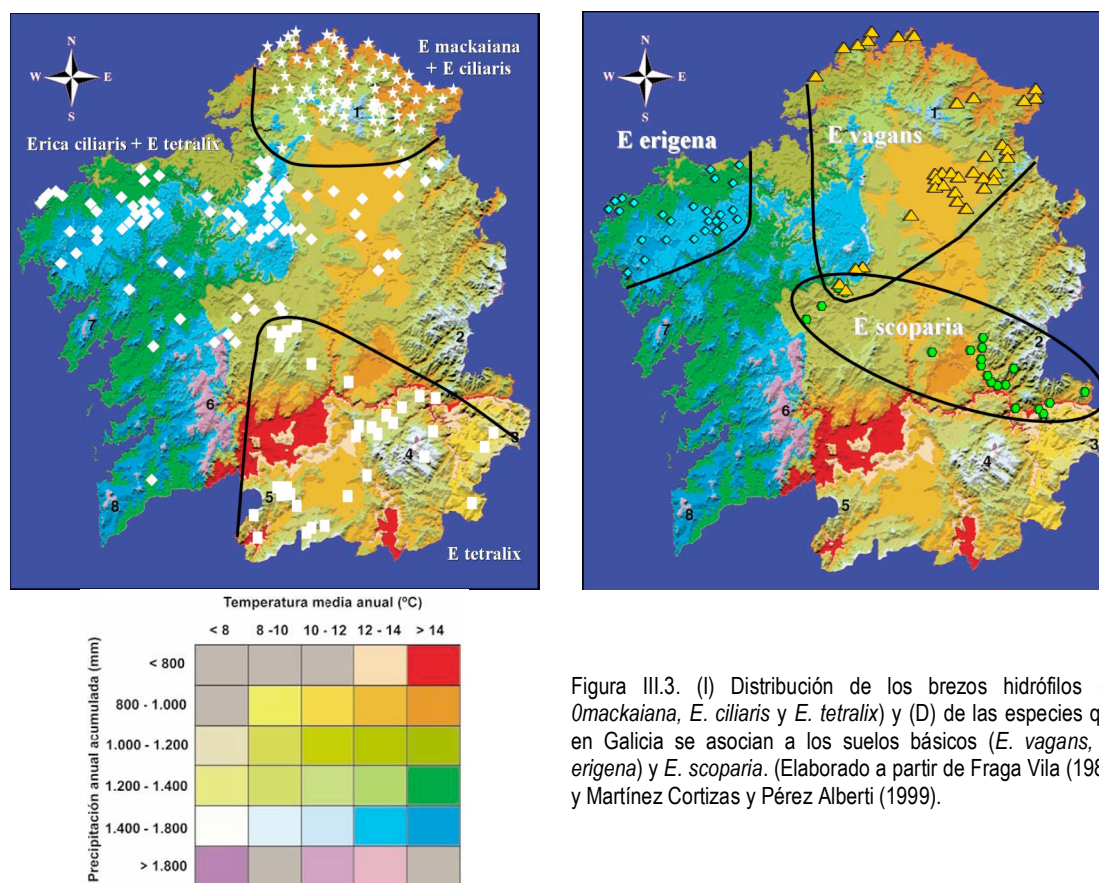


Figura III.3. (I) Distribución de los brezos hidrófilos (*E. Omackaiana*, *E. ciliaris* y *E. tetralix*) y (D) de las especies que en Galicia se asocian a los suelos básicos (*E. vagans*, *E. erigena*) y *E. scoparia*. (Elaborado a partir de Fraga Vila (1982) y Martínez Cortizas y Pérez Alberti (1999).

En Galicia, Retuerto & Carballeira (1990, 1992) identificaron las principales variables climáticas que gobiernan la distribución de un total de 53 especies leñosas (entre las que se encontraban las especies de brezos más comunes de Galicia), lo que en trabajos posteriores (Retuerto & Carballeira, 2004) les permitió diferenciar a *E. scoparia* por las posiciones extremadamente bajas del índice de sequía  $Q_e$  de Baudiere. Junto con otras especies de distribución típicamente mediterránea destaca por su tolerancia a la sequía, de ahí su presencia en áreas de clima continental, con marcadas fluctuaciones de temperaturas y precipitaciones y sequía estival de duración e intensidad significativas. En términos comparativos y según los mismos autores, la tolerancia a la sequía decrece en *E. umbellata* y *E. ciliaris* (esta última especie es característica de lugares con valores relativamente altos de temperatura media de las mínimas del mes más frío, propios de localidades costeras) y sobre todo, en el conjunto formado por *E. australis*, *E. mackaiana* y *E. cinerea*, que presentan valores muy altos del índice  $Q_e$  y ocupan posiciones claramente oceánicas. Considerada en conjunto, esta secuencia de brezos ordenada de norte a sur representa la transición entre las Regiones biogeográficas Eurosiberiana y Mediterránea (Retuerto & Carballeira, 2004), cuyos límites se localizan en el área de estudio.

## III.2.3. LITOLOGÍA

La distribución de las plantas inventariadas sobre los distintos materiales de partida del suelo (Tabla III.1) permite diferenciar los brezos *E. erigena* y *E. vagans* porque la mayoría de sus ejemplares se encuentran sobre un sustrato básico o ultrabásico (serpentinitas, dunitas granulitas), con porcentajes de próximos al 90% y del 75%, respectivamente. Aunque ninguna especie desprecia los suelos ricos en nutrientes, en comparación con estos valores tan elevados, los otros brezos se localizan en suelos desarrollados a partir de rocas básicas y ultrabásicas con frecuencias del orden del 20%, como *E. scoparia*, *E. mackaiana* y *E. ciliaris*, en el rango 10-20%, como *D. cantabrica*, *E. cinerea*, *E. tetralix* y *C. vulgaris*; o entre el 5 y el 10%, caso de *E. umbellata*, *E. arborea* y *E. australis*.

Tabla III.1. Distribución de plantas de brezos sobre suelos desarrollados a partir de diferentes litologías (en porcentaje)

	Nº muestras	Básicas y ultrabásicas	Areniscas y Cuarcitas	Esquistos	Granitos	Pizarras	Sedimentos	Turberas
<i>C. vulgaris</i>	598	12,4	19,1	7,7	21,9	22,9	6,9	9,2
<i>D. cantabrica</i>	360	16,7	11,4	9,7	31,4	23,3	4,4	3,1
<i>E. arborea</i>	394	9,4	16,2	2,0	7,4	55,1	9,9	0,0
<i>E. australis</i>	257	5,4	27,2	2,3	3,5	54,9	6,6	0,0
<i>E. ciliaris</i>	215	19,5	2,3	10,2	35,3	14,4	3,7	14,4
<i>E. cinerea</i>	602	14,6	10,6	7,8	27,9	27,9	8,0	3,2
<i>E. erigena</i>	17	88,2	0,0	11,8	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>E. mackaiana</i>	126	20,6	4,8	11,9	10,3	20,6	0,8	31,0
<i>E. scoparia</i>	56	21,4	3,6	0,0	7,1	30,4	37,5	0,0
<i>E. tetralix</i>	229	14,0	11,4	3,9	22,7	10,9	8,7	28,4
<i>E. umbellata</i>	322	9,0	16,5	8,7	29,5	26,1	7,8	2,5
<i>E. vagans</i>	49	75,5	0,0	8,2	4,1	10,2	0,0	2,0

Por otro lado, aunque *E. vagans* también está presente en suelos de carácter más ácido (con porcentajes del 10% e inferiores), las ausencias de *E. vagans* y *E. erigena* en algunos sustratos o su escasa presencia (< 5%), contribuyen a explicar la estrecha valencia ecológica de estos taxones que, no en vano, poseen áreas de distribución pequeñas. Así, *E. vagans* no se ha inventariado en sedimentos inorgánicos y en las litologías más pobres en nutrientes (areniscas-cuarcitas y turberas). En el caso de *E. erigena* la exigencia de un sustrato básico es aún más radical pues su presencia se limita a suelos desarrollados sobre rocas básicas y esquistos (básicos) de la Serie de Órdenes y prescinde tanto de los sustratos menos fértiles (areniscas-cuarcitas y turberas) como de los que presenta fertilidad intermedia-baja como pizarras y granitos. La mayoría de muestras de *E. erigena*, se localizan exclusivamente en las rocas básicas de Carballo (Coristanco) y Santa Comba (Fraga Vila, 1982) y en las serpentinitas de A Capelada (Rodríguez Oubiña *et al.*, 1997).

*E. scoparia* se distingue por las características climáticas de su pequeño territorio, encuadrado en la región mediterránea. En lo que respecta a la litología del sustrato parece presentar una valencia ecológica más amplia que los brezos anteriormente referidos y se asocia a los sustratos compuestos por sedimentos

inorgánicos, generalmente de edad terciaria, con un 37,5% de las muestras, y a las pizarras (30%). Cabe referir que se trata de materiales que generan gran cantidad de finos y textura limosa, lo que permite la existencia de agua edáfica en comparación con las texturas más gruesas, en idénticas condiciones climáticas y topográficas. Al igual que las restantes especies de brezos, *E. scoparia* no desdén los hábitats con sustrato de rocas básicas y presenta un 21,4% de las plantas sobre este tipo de suelos, un valor bastante alejado de las especies eminentemente basófilas y muy similar al de *E. ciliaris*.

Otras especies que parecen bastante selectivas en cuanto a la litología del hábitat son *E. arborea* y *E. australis* pues, en ambos casos, el 55% de las plantas inventariadas se han localizado en sustratos de pizarras (coincidiendo con Díaz Vizcaíno *et al.*, 1989 en lo que se refiere a *E. australis*), siendo el segundo material en importancia las cuarcitas, con valores de 16,2% (*E. arborea*) y 27,2% (*E. australis*). Los escasos ejemplares restantes se distribuyen con preferencia sobre las litologías más favorables, rocas básicas y sedimentos y cabe destacar su ausencia en los hábitats con sustrato turboso.

En los medios caracterizados por la presencia de turba predominan, como era de esperar, los brezos de las brañas, *E. tetralix* y *E. mackaiana*, en proporciones muy similares entre sí, en torno al 30%. Un análisis más detallado de la distribución de esas especies permite deducir la clara indiferencia que muestran ambas especies frente a las restantes litologías, pues se encuentran presentes sobre todos los tipos considerados. La excepción es la ausencia de *E. mackaiana* en sustratos compuestos por material sedimentario inorgánico, mientras *E. tetralix* se asocia a este medio en un 8,8% de los casos.

Por otro lado y en relación con el hábitat de turberas, se ha observado una cierta diversidad de especies de entre las consideradas ubicuas, aunque con porcentajes del 14% en sus respectivos inventarios (*E. ciliaris*) e inferiores, decreciendo según la secuencia: *C. vulgaris* (9,2%), *E. cinerea*, *D. cantabrica* (3%) y *E. umbellata* (2%). Al mismo tiempo, estas especies muestran también una gran plasticidad frente al material de partida del suelo, aunque mayoritariamente se encuentran sobre granitos y pizarras. El segundo sustrato más frecuente es rocas básicas (*E. ciliaris*, *D. cantabrica* y *E. cinerea*), pizarras (*C. vulgaris*) o areniscas-cuarcitas (*E. umbellata*), constituyendo una secuencia que refleja la variabilidad tanto de los niveles de fertilidad como de disponibilidad de agua edáfica según la textura de los suelos desarrollados sobre esas mismas rocas. Cabe destacar que la secuencia de brezos resulta muy acorde con la secuencia topográfica sobre granitos estudiada por Docampo (1972).

#### III.2.4. ALTITUD

El análisis estadístico de los datos de altitud aporta escasa información a este estudio (Tabla III.2). Únicamente contribuye a poner en evidencia la distribución de *E. arborea* y *E. australis* en las zonas montañosas de Galicia (Fraga Vila, 1982) y recoge los límites altitudinales que presentan los territorios de los brezos basófilos *E. vagans* y *E. erigena* en los complejos de rocas básicas de A Coruña (A Capelada Moeche, Bergantiños), de *E. erigena* en el afloramiento de Melide y de *E. scoparia* en los valles del interior montañoso de Galicia.

Una situación similar ofrece *E. mackaiana*, con máximas altitudes de 900 m en la Serra de Lourenzá e inferiores en la Serra do Xistral, al Nde la provincia de Lugo, mientras *E. tetralix*, su equivalente ecológi-

co en las formaciones hidromorfas y turberas del resto de Galicia, sobrepasa los 2.000 m de altitud. Las restantes especies se distribuyen por todos los niveles desde la costa, alcanzando las cotas máximas a los 1.000 m (*E. ciliaris*), 1.650 m (*D. cantabrica*) o hasta 2.000-2.100 m para la ya referida *E. tetralix*, junto a *E. umbellata* y *C. vulgaris*. La excepción más destacable es *E. erigena* porque la altitud mínima de los inventarios es 230 m y resulta un valor relativamente grande en comparación con los demás brezos, por lo que el rango de altitudes que abarca su área de distribución es también el mas estrecho.

Tabla III.2. Media, mediana y rango de los valores de altitud de los brezos gallegos  
(N: número de plantas)

	N	Mínima	Mediana	Promedio	Máxima
<i>Calluna vulgaris</i>	598	7	500	733	2100
<i>Daboecia cantabrica</i>	357	10	420	528	1650
<i>E. arborea</i>	394	20	975	920	1890
<i>E. australis</i>	257	50	1060	1060	1900
<i>E. ciliaris</i>	215	10	375	353	1025
<i>E. cinerea</i>	602	10	425	490	1720
<i>E. erigena</i>	17	230	290	319	390
<i>E. mackaiana</i>	126	45	510	504	900
<i>E. scoparia</i>	56	120	400	436	680
<i>E. tetralix</i>	230	10	495	724	2070
<i>E. umbellata</i>	322	7	460	569	2050
<i>E. vagans</i>	49	20	280	310	750

### III.2.5. ORIENTACIÓN

La orientación permite diferenciar un grupo de especies cuyas plantas se reparten en unas pocas clases de todas las consideradas, alcanzando valores del 20% o próximos (Tabla III.3). Se trata de: 1) *E. erigena* con preferencia por las exposiciones de componente Oeste y (SO, O y NO) con 18,8%, 25% y 18,8%, respectivamente; 2) *E. umbellata* con la mayor parte de los datos en el tercer cuadrante, en exposiciones S (24,6 %), SO y SE (19,0%), y 3) *E. arborea* que muestra mayor preferencia por las exposiciones N (23,5%), NE (14%) y E.(14,3%).

La mayoría de las especies calificadas como ubicuistas y *E. mackaiana* se han inventariado en todas las orientaciones consideradas mostrando escasa variabilidad entre ellas, en consonancia con su mayor valencia ecológica. Finalmente, se encuentran especies con un comportamiento intermedio entre los dos grupos ya descritos, que muestran preferencia por la exposición Sur pero en detrimento de la exposición Oeste (*E. scoparia*) o que resultan más indiferentes, salvo por las orientaciones de componente Este (*E. vagans*) y Oeste (*E. tetralix*).

Cabe referir el escaso número de muestras en la clase sin orientación (pendiente 0°), en la que destaca únicamente *E. tetralix*, con un 4,4% de las muestras.

Tabla III.3. Distribución de las plantas de brezos según orientación, en porcentaje

	N	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	s.o.
<i>C. vulgaris</i>	466	18,2	7,1	12,4	3,6	19,7	11,6	13,5	11,6	2,1
<i>D. cantabrica</i>	308	15,9	5,8	13,3	7,1	19,5	10,7	17,5	8,1	1,9
<i>E. arborea</i>	357	23,5	14,0	14,3	5,0	10,1	8,4	11,5	12,3	0,8
<i>E. australis</i>	236	16,5	4,2	13,6	7,6	14,0	13,1	18,6	11,4	0,8
<i>E. ciliaris</i>	149	17,4	6,0	14,8	6,7	18,1	12,8	16,1	6,0	2,0
<i>E. cinerea</i>	499	15,2	5,6	13,4	6,0	22,4	11,8	16,2	7,8	1,4
<i>E. erigena</i>	16	12,5	0,0	6,3	6,3	12,5	18,8	25,0	18,8	0,0
<i>E. mackaiana</i>	115	18,3	5,2	13,0	8,7	15,7	13,9	16,5	8,7	0,0
<i>E. scoparia</i>	44	15,9	13,6	9,1	13,6	29,5	13,6	4,5	0,0	0,0
<i>E. tetralix</i>	125	25,9	7,4	14,8	6,7	21,5	8,9	6,7	3,7	4,4
<i>E. umbellata</i>	252	9,9	3,6	12,3	3,6	24,6	19,0	19,0	7,1	0,8
<i>E. vagans</i>	42	14,3	2,4	7,1	7,1	23,8	14,3	16,7	11,9	2,4

### III.2.6. PENDIENTE

El factor pendiente del terreno permite diferenciar algunos grupos de especies según sus preferencias por las clases consideradas (Tabla III.4). Entre las especies que se encuentran habitualmente en áreas con pendientes inferiores a 5° destaca *E. tetralix*, por presentar el 65,8% de las plantas inventariadas en esta clase de pendiente, mientras las áreas de pendiente superior a 20° apenas cuentan con el 5% de los efectivos. También *E. ciliaris* y *E. mackaiana* parecen mostrar preferencia por las zonas de pendientes bajas: con frecuencias de 44,1 y 41%, respectivamente, se encuentran en áreas con pendientes inferiores a 5° y presentan todas las plantas en terrenos con pendientes inferiores a 30°. Junto a estas especies relativamente estenoicas se ha agrupado a *E. erigena*, debido al inferior rango de pendientes que presenta (< 20°) si bien en este caso, la clase de pendiente más frecuente es 5-10°, con el 56,3% de las muestras inventariadas.

Aunque en general, las restantes especies muestran una cierta preferencia por los sustratos planos, se diferencian de las anteriores en que las proporciones de muestran en la clase de pendiente menor de 5° son inferiores a 25% (*C. vulgaris*) y más habitualmente, inferiores al 15%. Cabría destacar la asociación más frecuentes de los brezos *E. arborea* y *E. australis* a las pendientes superiores a 60° (con un 6,0 y 7,9% de las muestras, respectivamente) y su menor presencia en terrenos llanos, con un 5% en el mejor de los casos (*E. australis*). También se aprecia que en algunas especies, la segunda clase más importante se corresponde con los intervalos 5-10° (*E. vagans*), 20-30° (*E. scoparia*) e incluso 40-60° (*C. vulgaris*). Finalmente, el grupo formado por *D. cantabrica*, *E. cinerea* y *E. umbellata* están presentes en todos los tipos de terrenos, pero con un reparto más homogéneo de las plantas en las clases de pendiente inferiores a 20°.

Tabla III.4. Distribución de las plantas de brezos según pendiente, en porcentaje

	N	<5	(5-10)	(10-20)	(20-30)	(30-40)	(40-50)	(50-60)	>60
<i>C. vulgaris</i>	456	24,9	4,2	6,7	9,5	16,4	18,0	19,2	1,2
<i>D. cantabrica</i>	302	12,5	22,0	20,4	22,4	11,4	2,4	7,5	1,6
<i>E. arborea</i>	354	3,1	7,1	9,7	21,7	22,3	11,7	18,3	6,0
<i>E. australis</i>	234	5,0	8,8	10,9	25,1	22,6	8,4	11,3	7,9
<i>E. ciliaris</i>	146	44,1	22,1	17,6	12,5	3,7	0,0	0,0	0,0
<i>E. cinerea</i>	492	11,5	18,6	19,5	22,0	15,1	3,0	8,5	1,8
<i>E. erigena</i>	16	18,8	12,5	56,3	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>E. mackaiana</i>	115	41,0	14,0	31,0	9,0	5,0	0,0	0,0	0,0
<i>E. scoparia</i>	44	15,9	13,6	9,1	13,6	29,5	13,6	4,5	0,0
<i>E. tetralix</i>	129	65,8	13,0	10,3	4,8	1,4	3,4	1,4	0,0
<i>E. umbellata</i>	250	13,2	21,8	17,1	24,4	12,4	2,6	6,8	1,7
<i>E. vagans</i>	44	12,2	9,8	39,0	19,5	14,6	0,0	4,9	0,0

N: número de plantas.

En lo que se refiere a las especies comunes a ambos estudios, estos resultados coinciden con los obtenidos por Díaz Vizcaíno *et al.* (1989) en su trabajo sobre preferencias y óptimos ecológicos de comunidades y especies de matorral en Galicia.

### III.2.7. DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES

El Factor Nutrientes permite diferenciar a *E. erigena* por presentar el valor máximo encontrado de FN (16,4), reflejo de una mayor exigencia en nutrientes, que parece encontrar de forma casi exclusiva en los suelos desarrollados sobre rocas básicas y ultrabásicas (Figura III.4). En segundo lugar se distingue un grupo de brezos con valores entre 7 y 9, decreciendo en el orden: *E. vagans* (8,7), *E. mackaiana* (7,8), *E. ciliaris* (7,6), *E. australis* (7,3) y *E. scoparia* (7,1).

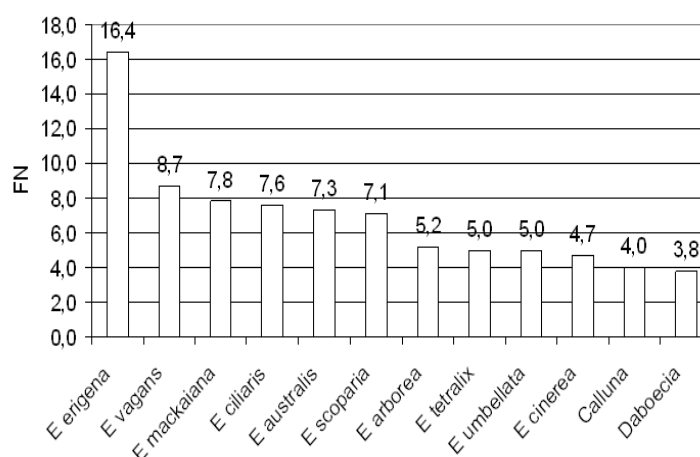


Figura III.4. Distribución del factor nutrientes (FN) con el valor medio sobre cada especie.



Con valores del factor Nutrientes inferiores, en el rango 4.5-5.5 se encuentra un tercer grupo formado por las especies *E. arborea* (5.2), *E. tetralix*, *E. umbellata* (5.0 y *E. cinerea* (4.7). Finalmente cabe referir como las especies más frugales, dada su mayor presencia y abundancia en suelos pobres en nutrientes, a *C. vulgaris* y *D. cantabrica*, con valores del FN específico de 4.0 y 3.8, respectivamente.

### III.2.8. DISPONIBILIDAD DE AGUA EDÁFICA

Los valores medios específicos de FRAU presentan un rango de variabilidad relativamente amplio, entre 277 mm (*E. tetralix*) y 77 mm (*D. cantabrica*), como se puede apreciar en la Figura III.5, en la que se pueden diferenciar cuatro grupos principales. Los valores medios de RAU de cada especie más elevados (superiores a 200 mm) corresponden, como era de esperar, a los brezos de las brañas *E. tetralix* (277 mm) y *E. mackaiana* (247 mm), junto a la especie mediterránea *E. scoparia* (254 mm), en consonancia con la mayor presencia de estas especies en sustratos encharcados de forma temporal o permanente: turberas y sedimentos inorgánicos.

Seguirían en orden decreciente del factor RAU el otro brezo de las brañas, *E. ciliaris* con una RAU media de 193 mm, y a continuación, *E. erigena* (157 mm) y *E. australis* (142 mm). El tercer grupo de brezos presentan valores medios de FRAU en torno a 100 mm y está integrado por *E. arborea* (111 mm) y las especies características de los brezales secos como *E. vagans* (107 mm) y *E. cinerea* (98 mm). Los brezos con menor disponibilidad de agua edáfica en sus hábitats son *C. vulgaris* y *D. cantabrica*, con 81 y 77 mm, respectivamente.

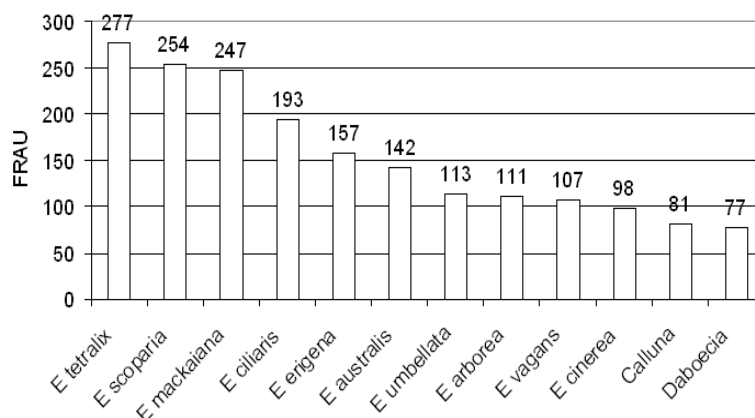


Figura III.5. Valor medio del factor Reserva de Agua Útil (FRAU) por especie.

### III.2.9. INTERACCIÓN DE FACTORES

La representación de las interacciones entre los valores específicos de los factores FRAU (reserva de agua útil) y FN (disponibilidad de nutrientes) en un cuadro matricial de doble entrada, (Tabla III.5), permite discriminar las doce especies de brezos atendiendo a sus requerimientos fundamentales en cuanto al tipo de sustrato. La consideración conjunta de estos resultados permite identificar a menor escala, las posibles diferencias entre las características físicas de los hábitats de las distintas especies de brezos de Galicia.

Tabla III.5. Valores medios de Factor nutrientes (FN) y Factor reserva de agua útil (FRAU) de los brezos de Galicia

FN	FRAU		Brezal seco					Brezal húmedo				
	77	81	98	107	111	113	142	157	193	247	254	277
16.4								<i>e</i>				
8.7				<i>v</i>								
7.8										<i>m</i>		
7.6									<i>cl</i>			
7.3							<i>a</i>					
7.1											<i>s</i>	
5.2					<i>ar</i>							
5						<i>u</i>						<i>t</i>
4.7			<i>cn</i>									
4.0		<i>cv</i>										
3.8	<i>d</i>											

(cv: *C. vulgaris*; d: *D. cantabrica*; cn: *E. cinerea*; cl: *E. ciliaris*; t: *E. tetralix*; m: *E. mackaiana*; e: *E. erigena*; s: *E. scoparia*; u: *E. umbellata*; v: *E. vagans*; a: *E. australis* y ar: *E. arborea*)  
En violeta las especies forestales y en rojo las especies del brezal seco.

En negrita las especies con áreas de distribución reducida, en azul los brezos de las brañas, en violeta las especies forestales y en rojo las especies del brezal seco.

En la Tabla III.5 se han señalado en negrita y cursiva las especies que presentan áreas de reducidas dimensiones en Galicia, básicamente distribución cantábrica (*E. vagans* y *E. mackaiana*), atlántica (*E. erigena*) y mediterránea (*E. scoparia*). La posición relativa de estas especies en la matriz de interacciones diferencia a *E. vagans*, que define el hábitat prioritario (4040) Brezales costeros atlánticos con *E. vagans*, de las restantes especies que exigen un mínimo grado de hidromorfía.

*E. erigena* y *E. vagans* se caracterizan por su acusada preferencia por los sustratos derivados de rocas básicas y ultrabásicas (con frecuencias próxima al 75% y al 90%, respectivamente). En comparación *E. erigena* resulta más exigente tanto en nivel de fertilidad del suelo ( $F_N$  16,3, con el máximo de todas las especies) como en disponibilidad de agua edáfica. Así, presenta un valor medio de RAU (157 mm), notablemente superior al de *E. vagans* (107 mm) e intermedio entre éste y los más de 200 mm de las especies de las brañas de Galicia (en secuencia creciente: *E. ciliaris*, *E. mackaiana* y *E. tetralix*), aunque por la descripción del hábitat de la especie descrito en la bibliografía (terrenos muy húmedos, generalmente encharcados y presencia asociada frecuentemente a cursos de agua, ríos y arroyos (Fraga Vila, 1982) se ha asignado al hábitat Brezales húmedos.

Las ausencias de *E. erigena* en muchos tipos de sustratos, con mayor disponibilidad de agua edáfica, aunque siempre más pobres en nutrientes, se refleja en su pequeña área de distribución. Las escasas plantas inventariadas (un total de 17, en Santa Comba, Coristanco, Vimianzo y Serra da Capelada) ocupan de forma preferentemente terrenos situados en la costa o en sus proximidades, con pendientes en el rango 5-10° y siempre inferiores a 20°; muy expuestos a los vientos predominantes en la zona de distribución, de componente W. El origen oceánico de los vientos determina la existencia de abundantes precipitaciones,

prácticamente constantes a lo largo de todo el año, por lo que la sequía estival es relativamente pequeña, en comparación con buena parte del territorio de Galicia.

La combinación de un suelo fértil y abundantes precipitaciones parecen definir las principales exigencias de esta especie. Además, la alteración de las rocas básicas genera suelos con texturas limosas y franco limosas, una característica que supone un mayor contenido de agua en el perfil a lo largo del año, en comparación con los suelos de texturas más gruesas, permitiendo a las especies vegetales una mayor resistencia a la sequía estival.

El requerimiento de agua de precipitación y su retención permanente en terrenos con pendientes inferiores a 20° parece imprescindible para la presencia de la especie, más que la necesidad de un sustrato rico en nutrientes, como se deduce de su ausencia en el afloramiento de Melide. Por el contrario, en esta localización están presentes los brezos *E. vagans* y el de distribución mediterránea *E. scoparia* (Fraga Vila, 1982; Rodríguez-Oubiña & Ortiz, 1991), donde encuentran los límites inferior y superior, respectivamente, de sus áreas de distribución.

A partir de estos resultados, se deduce que la **escasa resistencia a la sequía estival** podría ser, junto con las exigencias de un elevado nivel de fertilidad del suelo, el principal factor limitante de la expansión de las poblaciones de *E. erigena* en Galicia. La consideración de los resultados obtenidos por Retuerto & Carballeira (2004) sobre *E. scoparia* permite establecer que la resistencia a la sequía estival aumenta en la secuencia: *E. vagans* – *E. erigena* – *E. scoparia*.

*E. scoparia* se caracteriza por su área de distribución encuadrada en la Región Mediterránea, con escasas precipitaciones y prolongada intensa sequía estival en el territorio de Galicia. En esta situación geográfica muestra una aparente indiferencia por la pendiente del terreno y preferencia por las exposiciones de componente Sur, por lo que sus elevados requerimientos de agua edáfica deben satisfacerse necesariamente en las proximidades de los cauces de ríos y arroyos o bien con un sustrato profundo, como los que se encuentran en la orla de regeneración del bosque climácico, su hábitat natural más extendido. Las litologías dominantes en los inventarios con presencia de esta especie son sedimentos inorgánicos, mayoritariamente terciarios y también cuaternarios, que se localizan en los valles de los cursos de agua de diferente entidad, o bien en suelos desarrollados sobre rocas básicas y pizarras, que en general, proporcionan un nivel de fertilidad relativamente elevado y una gran capacidad de retención de agua en función de las texturas finas de los materiales de alteración. La ausencia de *E. scoparia* en las brañas y suelos turbosos confirma los requerimientos nutricionales de la especie ( $F_N = 7.1$ ) y se explica por el nivel de oligotrofia de este tipo de medios, que resulta ser muy bajo y con fuerte dependencia de las entradas de elementos procedentes de la atmósfera.

*E. mackaiana* es la especie que constituye un punto intermedio en la serie del brezal húmedo y el extremo más “exigente” en agua y nutrientes de la serie de brezos acidófilos (Tabla 9). Los tres brezos de las brañas de Galicia, *E. mackaiana*, *E. ciliaris* y *E. tetralix* se engloban en un mismo tipo de hábitat de interés comunitario, Brezales húmedos, aunque algunos de los requerimientos ecológicos específicos son bastante diferentes en los tres taxones. Anteriormente, se había apuntado la existencia de una diferenciación climática o edafoclimática importante entre sus hábitats, que pudiera explicar el solapamiento de las áreas

de distribución de *E. ciliaris* con *E. mackaiana* y con *E. tetralix* y la sustitución de *E. tetralix* por *E. mackaiana* en el Norte de Galicia.

En lo que se refiere a la litología, cabe destacar que ninguna de las tres especies desprecia los suelos desarrollados sobre rocas básicas (como la mayoría), pues se han encontrado con frecuencias del 12.4 % (*C. vulgaris*) y en torno al 20% (*E. ciliaris* y *E. mackaiana*) de las plantas inventariadas para cada especie. *E. mackaiana* se encuentra preferentemente (30%) en los hábitats turbosos (al igual que *E. tetralix*), permanentemente encharcados, y sobre suelos de texturas finas como pizarras (20%) y esquistos (12%), lo que le permite una cierta resistencia a la sequía estival, al menos en comparación con las texturas granudas de las litologías más frecuentes de *E. tetralix*: Granitos (22.7%) y areniscas-cuarcitas (11.4%). A modo de especie complementaria de las anteriores, *E. ciliaris* muestra preferencia sobre todo por los suelos desarrollados sobre granitos (35%) y en menor grado por pizarras y turberas (14.4%) (Figura III.6).

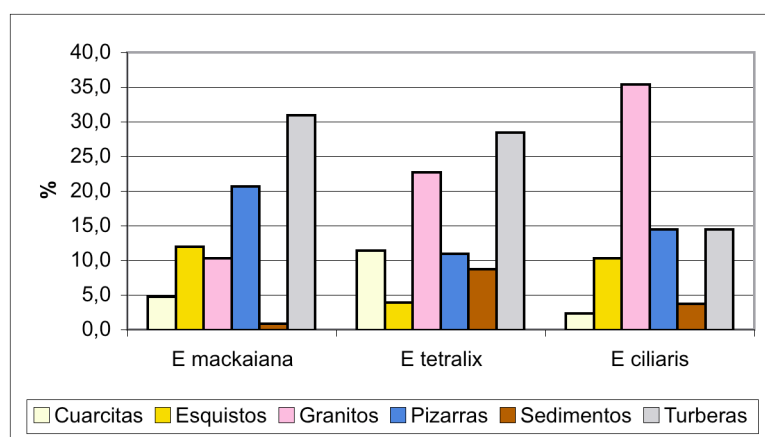


Figura III.6. Distribución de los brezos de las brañas en suelos ácidos.

Probablemente como compensación a las características litológicas (texturas) en las que están favorecidos los procesos de drenaje y eliminación de agua de los perfiles de los suelos (factor limitante), *E. tetralix* se encuentra mayoritariamente (80%) en los terrenos llanos o muy llanos, con pendientes de 5° o inferiores, donde se retienen las aguas de precipitación y son muy reducidas las velocidades del drenaje y la escoorrentía. Una respuesta similar al factor pendiente muestra en la distribución de muestras de *E. ciliaris* aunque más atenuada como consecuencia de la presencia de plantas en las clases de pendiente 5° (22.1%) y hasta 30°. En comparación, la segunda clase de importancia numérica de *E. mackaiana* es 5-10°, con el 31% de las plantas inventariadas, y como *E. ciliaris*, alcanza terrenos de hasta 30° y en una proporción ligeramente superior.

Sin embargo, la disponibilidad de agua edáfica en los medios naturales de las tres especies (Tabla 8) resulta ser creciente en la secuencia: *E. ciliaris* – *E. mackaiana* – *E. tetralix*, y se explica teniendo en cuenta la información que aportan la localización relativa de las áreas de distribución de las especies y, especialmente, el clima promedio de las mismas. Cabe recordar la distribución general N–S de los brezos *E. mackaiana* – *E. ciliaris* – *E. tetralix*, que refleja un gradiente climático de Galicia y que implica, en la misma dirección, una mayor independencia de las características climáticas y mayor peso de los factores

edáficos en la definición del hábitat, debido a la necesidad de compensar el descenso de precipitaciones y la mayor duración del período de sequía estival (crítico en las especies de zonas húmedas).

Así, *E. mackaiana* se ha inventariado en un área geográfica con gran influencia oceánica, que registra precipitaciones abundantes y prácticamente constantes como consecuencia de su exposición a los frentes atlánticos en el N de Galicia. En esta área resulta indiferente a la litología del sustrato (aunque muestra preferencia por las turberas), a la orientación, a la altitud, en cierta medida incluso a la pendiente (al menos, en comparación con los otros dos brezos de las brañas) y a la profundidad del suelo (Figura III.7).



Figura III.7. (I) Monte Curuxeiras. Al O de la Serra do Xistral. con presencia de *E. mackaiana* asociada a *Sphagnum* en las formaciones de turberas. (D) Localización de *E. mackaiana* en el suelo acumulado en las diaclasas del granito de a Toxiza. con una reserva de agua útil muy baja y dependiente de las precipitaciones. En ambos casos constituye la única especie de brezo presente y las condiciones de vigor y crecimiento son óptimas, excepto en la altura de las matas sobre granitos limitada por el escaso espesor del suelo y el porte rastrero en la zona expuesta al viento.

Su capacidad de colonizar diversos tipos de suelo justifica los elevados valores de los factores FN y FRAU pero cabe tener en cuenta su mayor frecuencia y abundancia en los suelos de turberas donde alcanzan su óptimo ecológico. En este tipo de hábitat constituye la única especie de brezo presente siendo destacable el encharcamiento permanente del suelo y la consiguiente ausencia de tojo (*Ulex gallii*) debido a la muy limitada velocidad de difusión del N<sub>2</sub> atmosférico en este tipo de medios. A pesar de esto, *E. mackaiana* no desdeña suelos más someros, con texturas que favorezcan la retención de agua u otro tipo de sustratos o situados en terrenos de pendientes bajas. Generalmente los inventarios se localizan en zonas con altitudes medias en torno a 500 m lo que supone que las precipitaciones son abundantes, por ejemplo en la Serra da Capelada (600 m), que constituye una zona de ecotono en el límite W de su territorio. El óptimo climático se encuentra al parecer en las turberas de la Serra do Xistral, sobre suelos permanentemente encharcados todo el año. La situación geográfica de esta sierra, que separa la Mariña luguesa en el sector costero nororiental de Galicia y la depresión interior de la Terra Cha, induce la existencia de unas características climáticas particulares y diferenciales en estos tres territorios. La sierra constituye una barrera frente a la progresión de los frentes oceánicos en su camino hacia el interior y su influencia se deja sentir intensificando la precipitación de las laderas orientadas al Norte y como pantalla protectora a sotavento de los flujos de componente S-SO. En esta localización (situación de óptimo ecológico) el requerimiento de agua edáfica (FRAU) de *E. mackaiana* inferior al de *E. tetralix*. (Tabla III.5) se puede explicar porque las necesidades hídricas de la especie se satisfacen a partir de la atmósfera, en forma de



precipitaciones constantes y nieblas persistentes, favorecidas en exposiciones de componente Norte. Por su parte, *E. tetralix* debe disponer de unas condiciones topográficas adecuadas para el desarrollo de suelos permanentemente encharcados, donde encontrar su óptimo ecológico, especialmente en el SE de Galicia. En este último territorio compite ventajosamente frente a *E. ciliaris* en los suelos con encharcamiento permanente, cuya distribución se asocia a suelos mejor drenados.

Como consecuencia importante, se puede establecer que a pesar de la consideración de equivalentes ecológicos que poseen los brezos de las brañas, *E. tetralix*, *E. ciliaris* y *E. mackaiana*, a la hora de determinar la presencia de hábitats de interés comunitario, se han encontrado diferencias en el grado en que los elementos físicos definen sus hábitats particulares, en sentido ecológico. Estas diferencias vienen a confirmar las descripciones más generales dadas por CSIC (1996) en relación con los hábitats de estas tres especies: brezales y matorrales en suelos ácidos más o menos húmedos (*E. ciliaris*); brezales muy húmedos (*E. tetralix*) y suelos permanentemente húmedos (*E. mackaiana*).

La serie de brezos acidófilos comprende varias especies que se presentan en una amplia diversidad de condiciones ambientales, desde suelos pobres en nutrientes y de carácter comparativamente más xérico, hasta sustratos permanentemente encharcados sobre todas las litologías consideradas. Junto a especies características de ambientes hidromorfos, ya comentado, incluye taxones ampliamente distribuidos por toda Galicia, aparentemente indiferentes a la litología del sustrato (salvo los brezos forestales, *E. arborea* y *E. australis*) o a las condiciones (macro)climáticas. De su condición de simpátridas se deduce la existencia de diferencias significativas entre los hábitats que pueden ocupar, evitando la competencia entre ellas.

Los brezos *E. arborea* y *E. australis*, superponen sus áreas de distribución de forma notable, aunque no establecen relaciones de competencia interespecífica en el territorio debido a que ocupan hábitats diferentes. Así, *E. arborea* presenta cierta exigencia de humedad y tendencia umbrófila (Docampo Álvarez, 1972), por lo que se localiza en el interior de las masas boscosas, como matas aisladas, sin formar brezal (Fraga Vila, 1982). En este hábitat compite con éxito por la luz gracias a su porte arbóreo, mientras *E. australis*, se suele encontrar en espacios más abiertos, como en la orla de regeneración del bosque caducifolio (Figura III.8).



Figura III.8. (I) *E. arborea* se encuentra asociada al ambiente umbroso del bosque caducifolio en zonas montañosas y generalmente en las proximidades de cursos de agua. Orilla derecha del Eume, aguas abajo de As Pontes (D) *E. australis* se localiza en espacios más abiertos como en la orla de regeneración del bosque caducifolio en la fraga de Besteburiz, en el municipio de Muras (Lugo).

A pesar de esta marcada distinción de hábitats, la posición relativa de ambas especies en la matriz de interacciones (Tabla III.5) viene a indicar que, en general, *E. australis* dispone de unas condiciones ambientales más favorables para la obtención de agua y nutrientes que *E. arborea*. Este resultado se encuentra en franca contradicción tanto con la descripción de los hábitats anteriormente expuesta como con la distribución de plantas de las dos especies según material de partida del suelo: la distribución de las plantas inventariadas en los tipos de litología considerados es bastante similar entre las dos especies salvo por una ligera preferencia de *E. arborea* por suelos con mayor nivel de fertilidad reserva de agua útil (textura, proximidad a recurso hídrico o profundidad del perfil) como en rocas básicas y sedimentos en detrimento de los suelos pobres y arenosos desarrollados sobre areniscas- cuarcitas (dominados por *E. australis*). Los datos las clases de pendientes más altas indican que son ocupados con mayor frecuencia por *E. arborea* en el rango 30-60° siendo sustituida parcialmente por *E. australis* en los terrenos más escarpados donde la disponibilidad de agua y nutrientes está limitada por la muy inferior profundidad de suelo en comparación con el fondo de valle.

Puesto que el análisis de los factores ambientales físicos confirma la descripción de los hábitats de los brezos arbóreos recogida en la bibliografía (Fraga Vila, 1982), la contradicción en la expresión de los resultados en la matriz de interacciones es imputable a que *E. arborea* no forma matorrales sino que se presenta en forma de plantas aisladas. En consecuencia su abundancia en los inventarios (estimada como el grado de cobertura) va a ser siempre muy inferior a la de los restantes brezos y esta idea se confirma al comparar las frecuencias relativas de ambas especies en el conjunto de plantas inventariadas mayor en *E. arborea* (12.2% del total) que en *E. australis* (8%) (Figura III.1).

Los valores específicos de  $F_{RAU}$  en la serie de las **especies acidófilas de brezal seco**, indican que las condiciones de agua edáfica más habituales de las especies siguen una secuencia que coincide, en la parte que corresponde a las especies en común, con las obtenidas por Kashimura (1985) en Escocia (que explica la distribución de *C. vulgaris*, *E. cinerea* y *E. tetralix* en un gradiente microtopográfico en atención a resistencia a la deshidratación que presentan); y por Gloaguen (1987) en Francia con las mismas especies que el anterior y *E. ciliaris*.

La serie obtenida en el presente estudio resulta en gran parte concordante con la descrita por Docampo Álvarez (1972) sobre granitos en Santiago de Compostela, salvo por la posición relativa de *E. umbellata* con respecto a *E. australis* y *E. cinerea*, que resultan inversas en el presente estudio. Cabe referir que la escala de trabajo del presente estudio es superior y en consecuencia recoge una mayor variedad de ambientes y taxones distribuidos por toda Galicia. Por otro lado, cabe destacar la similitud de los factores FN y FRAU entre *E. umbellata* y *E. arborea* en la matriz de interacciones, lo que junto a la coincidencia de sus respectivas áreas de distribución europeas y a la vista las características físicas del medio forestal frecuentado por *E. arborea* permite considerar el factor profundidad de suelo como uno de los elementos definitorios que los hábitats de algunas especies de brezos.

*E. umbellata* constituye el extremo que indica una mayor disponibilidad de recursos edáficos en el grupo de brezos formado por especies *E. cinerea*, *C. vulgaris* y *D. cantabrica*. Esta posición relativa de *E. umbe-*

*llata* (y también de *C. vulgaris*) contradice el carácter frugal de la especie y refleja el peso de la abundancia media del taxón en los inventarios, más que sus exigencias ambientales o la variación de situaciones en las que se puede encontrar (variación muy similar por cierto en las cuatro especies) (Figura III.9).

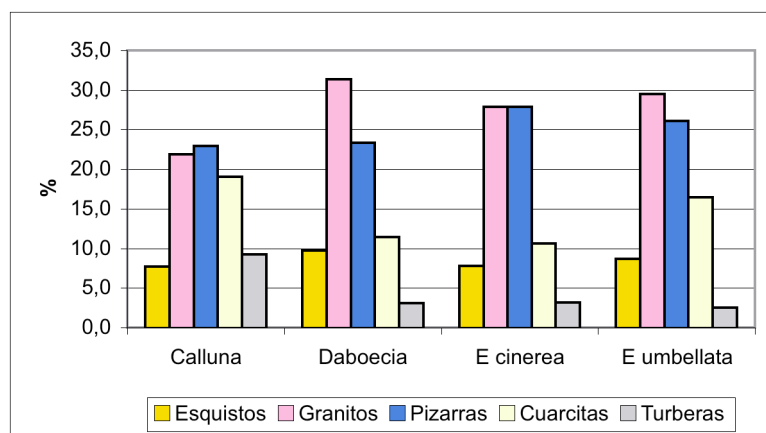


Figura III.9. Distribución de los brezos acidófilos del brezal seco en suelos ácidos.

Todas ellas se presentan en todas las litologías consideradas, con preferencia por granitos y pizarras. La distribución de muestras en los suelos desarrollados sobre areniscas-cuarcitas, de los más pobres en nutrientes diferencia dos grupos formados por: 1) *C. vulgaris* y *E. umbellata* con el 15-20% de las plantas inventariadas; y 2) *D. cantabrica* y *E. cinerea* que presentan frecuencias de poco más del 10%.

Las clases de pendiente más frecuentes (5-20°) son también similares entre estos taxones exceptuando *C. vulgaris* que presenta una distribución de plantas bimodal definida por las clases inferior a 5° (en hábitats de turberas) y 30-60° sobre las demás litologías. Cabe destacar que según se desprende de la Figura III.10 la distribución de plantas que muestra *C. vulgaris* resulta complementaria a las de las otras tres especies hasta los 60° de pendiente, de manera que *C. vulgaris* se hace dominante en las turberas (las otras son de ambiente más seco) y en pendientes superiores a 30°, declinando la frecuencia de las otras 3 especies en la misma dirección.

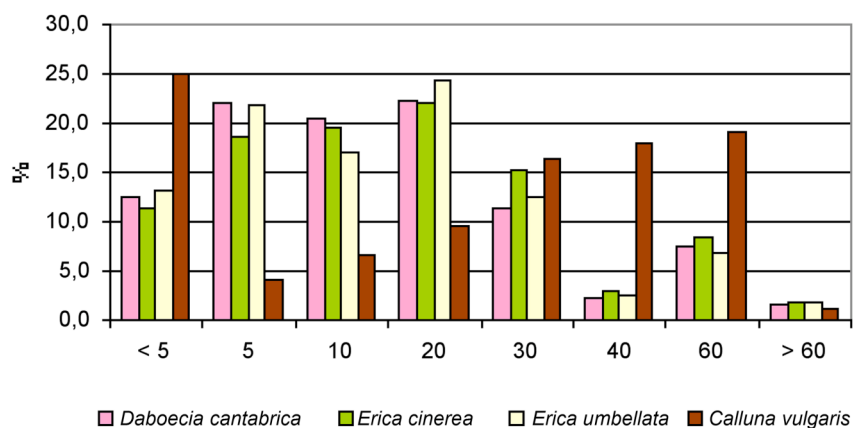


Figura III.10. Distribución de los brezos acidófilos del brezal seco según clases de pendiente.



Los datos de orientación indican la preferencia de *E. umbellata* por las exposiciones de componente Sur en un 60% de las plantas inventariadas, lo que supone unas condiciones ambientales y particularmente edáficas de mayor xericidad en los hábitats de esta especie en comparación con las restantes. Esta planta posee varios rasgos morfológicos que permiten definirla como esclerófila (también *C. vulgaris*) y deducir que posee una elevada resistencia a la sequía estival y otras adaptaciones a las situaciones de estrés hídrico, lo que explica su establecimiento y pervivencia sobre suelos esqueléticos pedregosos e incluso en fisuras de las rocas. La consideración conjunta de esta información confirma el carácter más frugal y su mejor adaptación a los suelos degradados de *E. umbellata* y *C. vulgaris* en comparación con *E. cinerea* (Docampo Álvarez, 1972) y *D. cantabrica*. Además estas últimas podrían ser más exigentes en cuanto a profundidad de suelo, que proporciona más nutrientes y disponibilidad de agua edáfica, en igualdad de clima. Material de partida del suelo y posición topográfica

### III.2.10. LAS ÁREAS DE ECOTONO

La presencia simultánea de especies con diferentes requerimientos de sustrato (en cuanto a humedad edáfica o capacidad de aportar nutrientes) en un mismo inventario que representa idénticas condiciones ambientales para las especies presentes constituye un indicador ambiental fiable de la existencia de un área de **ecotono**. Esta situación puede darse a diferentes escalas en los límites de las áreas de distribución de las especies y a una escala inferior dentro del propio área de distribución si existe un gradiente o, en general, una variación de las condiciones ambientales. Como consecuencia al menos algunas especies se encuentran desplazadas de su óptimo ecológico y el hábitat correspondiente resulta deficiente o excesivo en algún factor ambiental (físico o biótico) que se convierte en limitante al crecimiento desarrollo o expansión de las plantas. Esto es especialmente cierto en lo que se refiere a las especies estenoicas en comparación con las especies ampliamente extendidas por toda Galicia.

La Serra da Capelada constituye un enclave privilegiado donde convergen especies propias de ambientes con un elevado nivel de hidromorfía en el sustrato como *E. mackaiana* (FRAU: 247 mm) y *E. erigena* (FRAU: 157 mm) junto a *E. vagans* (FRAU: 107 mm). En este enclave se han inventariado la mayor parte de las plantas de *E. vagans*, un total de 45, encuadradas mayoritariamente (71%) en hábitats de brezales húmedos, donde acompañan a *E. mackaiana* (28/45), *E. ciliaris* (7/45) o ambas (7/45). La presencia de *E. vagans* en la Serra da Capelada se justifica por la existencia de un sustrato derivado de rocas ultrabásicas, habiéndose identificado dos situaciones diferentes según refleja el estado de crecimiento de *E. vagans* (Figura III.11). Las principales diferencias entre los dos hábitats se refieren al contenido de agua edáfica y su disponibilidad tanto en cantidad como en duración. Las áreas cuninales de la sierra forman áreas aplanadas con bajas pendientes que favorecen la retención de las aguas de las precipitaciones (abundantes) en forma de charcos y en consecuencia, la situación de hidromorfía permanente en los suelos, independientemente de su profundidad. En este medio el crecimiento de las matas (ralo por la persistencia de los vientos oceánicos) y sobre todo su escasa altura (inferior a 30 cm) en comparación con el hábito del taxón (10-80 cm y hasta 1 m de altura máxima), indican que la especie no se encuentra en su óptimo ecológico a pesar de la generosa e imprescindible aportación de la litología del sustrato (rocas

ultrabásicas). Por el contrario, *E. mackaiana* encuentra un hábitat adecuado para su establecimiento incluso en terrenos removidos mostrando buenas condiciones de vigor salvo por la altura de las matas, intermedia-baja según en el rango (10-60 cm) descrito para *E. mackaiana* (CSIC, 1996), y limitada por las condiciones de viento y profundidad del sustrato.



Figura III.11 (I) Las condiciones ambientales del Alto de Vixía Herbeira parecen encontrarse bastante alejadas del óptimo ecológico de *E. vagans* como reflejan el crecimiento ralo de las matas, el hábito rastrero y la escasa altura de las matas. (D) Sin embargo, *E. mackaiana* muestra buenas condiciones de vigor incluso tras perturbación reciente.

Además de ocupar las áreas culminares *E. vagans* se encuentra abundantemente en las laderas empinadas que descienden hacia la costa donde prosperan en taludes, terraplenes y cunetas con gran extensión (Figura III.12). En las zonas bajas de las laderas los suelos son más profundos por acumulación de material terrígeno coluvial y eluvial y la baja pendiente favorecen la persistencia de unas condiciones de hidromorfía aceptables para esta especie que se reflejan en la frecuencia, abundancia y condiciones de crecimiento que muestran las plantas.

Las diferencias fundamentales entre los dos tipos de hábitats radican en la pendiente del terreno y en cierta medida, en la orientación a barlovento o sotavento de los vientos cargados de humedad. En posición topográfica de media ladera las aguas de precipitación, aunque abundantes, escurren con rapidez hacia el valle y el drenaje a través del perfil del suelo también es muy rápido, generando un sustrato que confiere una mayor duración del período de sequía estival. La especie emblema del Hábitat prioritario (4040) “Brezales costeros atlánticos secos con *E. vagans*” presenta aquí ventaja competitiva frente a *E. mackaiana* que al contrario que la anterior, es una especie más exigente en recurso hídrico que en litología del sustrato.



Figura III.12. En la Serra da Capelada *E. vagans* se asocia a taludes, terraplenes y cunetas con pequeño espesor de suelo y en áreas de pendiente lo que favorece un drenaje rápido y la ausencia de encharcamiento temporal.

Cabe hacer referencia a la lamentable falta de inventarios en gran parte del área de distribución de *E. vagans* concretamente el sector que se extiende en forma de banda desde Ribadeo hasta Melide donde sí se ha constado su presencia (Fraga Vila. 1982). Los datos obtenidos en esta área contribuirían sin duda a confirmar los resultados obtenidos hasta ahora y definir con mejor precisión los requerimientos ecológicos de esta especie.



### III.3. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Las especies de brezos de Galicia muestran diferencias muy marcadas en lo que se refiere tanto a los tipos de hábitats que colonizan como a los principales factores ambientales que limitan su desarrollo y permanencia (disponibilidad de agua, fertilidad del suelo, sequía estival, etc.). A grandes rasgos, la consideración conjunta de las preferencias de los brezos con respecto a nutrientes y agua edáfica, y la información obtenida en el estudio de los condicionantes topográficos del edafoclima (altitud, pendiente y orientación), permite establecer algunas diferencias entre las características físicas de los hábitats de las distintas especies de brezos de Galicia. De esta manera, se han podido confirmar algunos de los extremos recogidos en la bibliografía principal sobre la materia, y se ha contribuido a ampliar la información sobre los elementos del medio físico que constituyen los lugares donde viven los brezos y sobre los nichos ecológicos de las doce especies presentes en Galicia. Los hábitats que albergan las doce especies de brezos gallegos son caracterizados sucesivamente por las condiciones de litología (fertilidad), reserva de agua edáfica, clima y profundidad del sustrato como se indica a continuación:

- 1.- Hábitats definidos por la existencia de suelos desarrollados sobre rocas básicas o ultrabásicas, diferenciándose (a) suelos bien drenados en las laderas o al pie de los montes (*Erica vagans*) y (b) sustratos encharcados permanentemente en áreas expuestas a los vientos de componente Oeste cargados de humedad procedentes del océano (*Erica erigena*).
- 2.- Hábitats caracterizados por la presencia de sustratos que garantizan, en la región biogeográfica mediterránea una reserva de agua edáfica constante a lo largo del año: suelos sedimentarios de origen coluvial y eluvial o desarrollados sobre rocas que se alteran dando texturas finas (*Erica scoparia*).
- 3.- Hábitats con suelos que se encuentran encharcados la mayor parte del año, una situación que es favorecida por una topografía plana (*Erica tetralix*) o por abundantes precipitaciones (*Erica mackaiana*). Según se rebaja el grado de hidromorfía del sustrato aumenta la frecuencia de *Erica ciliaris* acompañando a las dos anteriores siempre que clima, relieve y litología (por ese orden) permitan la existencia de una cierta humedad en el suelo.
- 4.- Hábitats definidos principalmente por la presencia de suelos pedregosos esqueléticos, desarrollados sobre coluvios de rocas metamórficas ácidas o muy ácidas (pizarras, areniscas-cuarcitas). Estos sustratos constituyen generalmente el resultado extremo de la erosión de los horizontes edáficos superficiales que sustentan a las otras formaciones de matorral. Los brezos *Erica umbellata* y *Calluna vulgaris* son especialistas en medios extremos debido a los largos períodos de sequía estival, aunque pueden colonizar todo tipo de medios gracias a su amplia valencia ecológica.
- 5.- Hábitats con sustratos más profundos capaces de enraizar adecuadamente y sostener los brezos de mayor porte que se localizan (a) en las condiciones umbrías del interior de las masas boscosas

aislados sin formar matorral propiamente dicho (*Erica arborea*) y (b) en condiciones más abiertas (*Erica australis* y, en la región mediterránea, *Erica scoparia*).

- 6.- Hábitats con suelos someros o de profundidad media que, aunque condiciona la existencia de una cierta sequía estival representa una situación intermedia entre los hábitats 4 y 5 anteriormente descritos. Los brezos se encuentran sobre una amplia variedad de materiales de partida de suelo y posiciones topográficas y ampliamente distribuidos por Galicia (*Erica cinerea* y *Daboecia cantabrica*).

## CONCLUSIONS DU CHAPITRE HABITATS

Les espèces de bruyères de Galice montrent des différences très marquées aussi bien au niveau des types d'habitats qu'elles colonisent qu'à celui des principaux facteurs environnementaux qui limitent leur développement et implantation permanente (disponibilité d'eau, fertilité du sol, sécheresse estivale, etc.). D'une façon générale, la considération des préférences des bruyères en relation avec les nutriments, l'humidité des sols, les conditions topographiques et pédo-climatiques (altitude, pente et orientation) permettent d'établir des spécificités d'habitats des diverses espèces de bruyères de Galice. Les données de la bibliographie relatives à l'habitat des différentes espèces de bruyères ont pu être confirmées et les niches écologiques des douze espèces présentes en Galice ont été précisées. Les habitats qui des douze espèces de bruyères galiciennes ont été caractérisés par la nature du substrat lithologique, la profondeur de ce substrat (qui conditionne la fertilité des sols), la réserve en eau des sols et le climat, comme cela est exposé ci-après:

- 1.- Habitats définis par l'existence de sols développés sur des roches basiques ou ultrabasiques, se distinguant par (a) des sols bien drainés sur les versants ou au pied des montagnes (*Erica vagans*) et par (b) des substrats constamment humides ou même inondés dans des zones exposées aux vents de secteur ouest chargés d'une humidité provenant de l'océan (*Erica erigena*).
- 2.- Habitats caractérisés par la présence de substrats garantissant, dans la région biogéographique méditerranéenne, une réserve en eau des sols constante tout au long de l'année: sols sédimentaires d'origine colluviale et éluviale ou développés sur des roches qui s'altèrent et acquièrent des textures fines (*Erica scoparia*).
- 3.- Habitats de sols inondés la majeure partie de l'année, situation favorisée par une topographie plane (*Erica tetralix*) ou d'abondantes précipitations (*Erica mackaiana*) ; à mesure que se réduit le degré d'humidité et d'hydromorphie du substrat, la fréquence d'*Erica ciliaris*, accompagnant les deux espèces précédentes, s'accroît quand le climat, le relief et la lithologie (en suivant cet ordre) conduisent à une diminution au moins temporaire de l'humidité dans le sol.
- 4.- Habitats principalement définis par la présence de sols rocailleux, squelettiques, développés sur des colluvions de roches métamorphiques acides ou très acides (ardoise, sable, quartzite). Ces substrats constituent généralement le résultat de l'érosion des horizons pédologiques superficiels et favorisent l'installation d'autres espèces buissonnantes. Les bruyères *Erica umbellata* et *Calluna vulgaris* sont espèces spécifiques de ces milieux extrêmes, avec de longues périodes de sécheresse estivale, encore qu'elles puissent coloniser toute sorte de milieux grâce à leur vaste valence écologique.

- 5.- Habitats sur substrats plus profonds, permettant un meilleur enracinement favorisent l'installation d'espèces de bruyères de plus grande taille, lesquelles se trouvent (a) dans les situations ombragées au sein de massifs boisés isolés, sans former de véritables buissons (*Erica arborea*) et (b) dans des conditions plus ouvertes (*Erica australis* et, dans la région méditerranéenne, *Erica scoparia*).
- 6.- Habitats aux sols sommaires ou à une profondeur moyenne qui représente une situation intermédiaire entre les susdits habitats 4 et 5, bien qu'elle conditionne l'existence d'une certaine sécheresse estivale. Ces bruyères sont ubiquistes, installées sur une large variété de matériaux de départ du sol et de positions topographiques et largement distribuées en Galice (*Erica cinerea* et *Daboecia cantabrica*).





# **CAPÍTULO IV**

## **RELACIONES**

### **SUELO-PLANTA**



## IV.1. INTRODUCCIÓN

El suelo genérico que ocupan los brezos es ácido y pobre en nutrientes (Gimingham, 1981; Symes & Day, 2003), con condiciones de drenaje que van desde las excesivamente drenadas al encharcamiento durante periodos más o menos prolongados. Son suelos de tipo aluminico, podzólico o con carácter gleyco, meso-oligotróficos con bajos niveles de K, Ca y Mg en el complejo de cambio (*Erica* sp.), escaso P disponible (*D. cantabrica*) y bajo pH (ambos géneros) (Zas & Alonso, 2002). En las cumbres de las sierras la formación de matorral parece presentar su límite de distribución ocupando áreas cubiertas por una delgada capa de suelo (horizonte A Úmblico, A Ótrico o H, Hístico), de modo que las raíces de las plantas alcanzan el suelo mineral subyacente. Se trata, en general, de áreas de fuerte pendiente donde los procesos erosivos originan suelos de bajo grado de evolución, que evidencian un rejuvenecimiento por procesos de dinámica de vertientes. En estos medios fuertemente extractivos, donde el drenaje y la escorrentía superficial contribuyen a la rápida eliminación del agua del perfil, la disponibilidad de nutrientes se ve notablemente reducida. De forma similar en posiciones de baja pendiente con drenaje impedido los brezos colonizan los suelos de las brañas y las turberas minerotróficas, caracterizados por su baja actividad biológica y la acumulación de materia orgánica parcialmente descompuesta, y donde la hidromorfía impone fuertes restricciones a los organismos.

La vegetación de los brezales se mantiene por la constante disminución de los nutrientes presentes en el suelo, lo que impide la colonización por otras especies más competitivas, ya que estas plantas son especialistas en colonizar medios gobernados por factores que imponen condiciones de estrés (Gilbert & Anderson, 1998). Para poder vivir en estos medios los brezos adoptan distintas estrategias como mantener bajas concentraciones foliares en nutrientes (N y sobre todo, P), su elevada relación fibra/proteína que redundan en una menor palatabilidad para el ganado; presencia de fenoles, ligninas y taninos, que retienen el escaso N disponible en el suelo en forma de complejos orgánicos recalcitrantes (Terradas, 2001). Estas plantas obtienen el N a partir de la lenta mineralización de la materia orgánica en simbiosis con hongos micorrícicos, gracias a los cuales también exploran un mayor volumen de suelo y obtienen fósforo y otros nutrientes, que son extraídos directamente de los minerales de la roca por dichas micorizas ericoides (Mitchell & Gibson, 2006). Otra estrategia adoptada es la adaptación a la sequía como perennifolios esclerófilos (Connor & Doley, 1981) lo que hace que mantengan su capacidad fotosintética a lo largo de todo el año, controlando las pérdidas de agua cuando el recurso es limitado y siendo capaces de mantener balances positivos de aún con altos niveles de estrés hídrico.

Según se reduce el nivel de trofia del medio disminuye la variedad y la densidad de especies de brezos y la comunidad se enriquece en especies propias de medios muy oligotrofos (musgos, insectívoras); si por el contrario aumenta el grado de trofia y sube el pH, se produce la rápida sustitución por herbáceas, más competitivas en suelos más fértiles (Alonso, 2004). Tradicionalmente el matorral ha estado sometido a un proceso de transformación intensa para su conversión en praderas y pastizales, de mayor eficiencia energética para el mantenimiento del ganado vacuno. La transformación se realiza tras la eliminación o desbroce de la vegetación de matorral, siguiendo con un encalado y una fertilización especialmente rica en N, P y K, que permitan la rápida instalación de diferentes mezclas de pratenses.

El primer trabajo sobre el matorral realizado en el campo de la Ecología en Galicia es el de Docampo Álvarez (1972) y resulta muy esclarecedor al analizar la distribución de las especies clasificadas como ubicuas a lo largo de una secuencia topográfica (Figura IV.1) y en relación a los tipos de suelos asociados. *Ulex europaeus* y *Erica umbellata* son las especies dominantes en los suelos menos desarrollados y las únicas que colonizan las fisuras de rocas. Se trata de suelos de tipo Leptosol, úmbrico o lítico, en las posiciones de mayor erosividad y Umbrisoles o Regosoles húmicos y/o lépticos, en zonas de ladera donde se produce una acumulación de materiales.

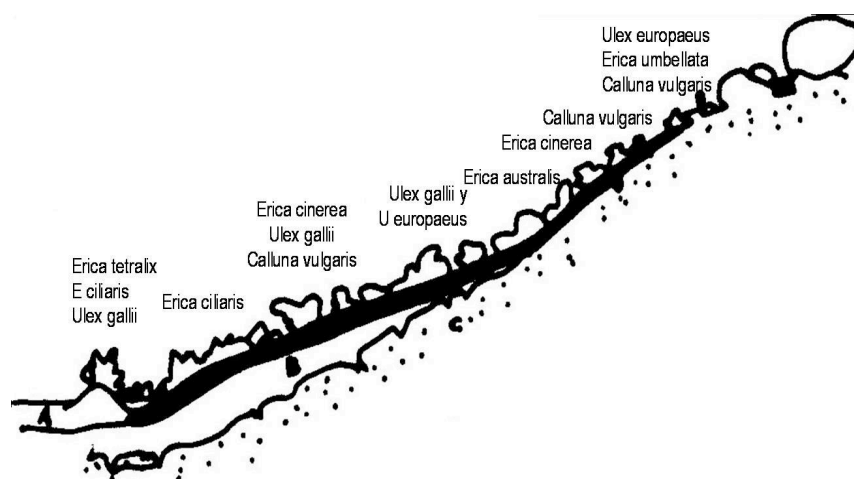


Figura IV.1. Distribución brezos en un corte topográfico (Tomado de Docampo Álvarez, 1972).

Según aumenta la profundidad del sustrato edáfico *Ulex gallii* empieza a sustituir a *Ulex europaeus* y *E. cinerea* se hace más frecuente, constituyendo el principal indicador, si bien el brezal muestra una composición más completa en especies secundarias, principalmente gramíneas. Donde la pendiente del terreno permite la existencia de niveles con persistencia de humedad edáfica, *U. europaeus* cede el sitio a *U. gallii* y comienza a ser frecuente *E. ciliaris*. Si el encharcamiento es constante *E. tetralix* es, por sí sola o asociada a *E. ciliaris*, la especie dominante en las áreas de transición a turbera, donde los musgos constituyen un componente importante de la vegetación.

La secuencia de los brezos en el perfil topográfico estudiada por Docampo (1972) refleja, en último término, la variabilidad de suelos y hábitats generada por el relieve, un factor de formación de suelo que condiciona la profundidad del sustrato, la disponibilidad de agua en el perfil y la fertilidad del suelo. Puesto que el clima y el material de partida (granitos) son homogéneos, la autora concluye que el principal factor que afecta a la distribución de estas especies es el grado de humedad edáfica. La excepción la constituye *C. vulgaris* por tratarse de una especie que se encuentra tanto en suelos encharcados como en los sustratos de máxima aridez y de ahí su gran expansión. Estos resultados contribuyen a fundamentar el hecho de que algunas especies actúan como indicadoras de ciertas condiciones ambientales, concretamente, en este caso, del grado creciente de humedad edáfica en la secuencia:

$$E. umbellata < E. cinerea < E. australis < E. ciliaris < E. tetralix$$

Hasta el momento los estudios sobre el papel del suelo en el ecosistema matorral se centraron en general hacia cuestiones sobre la influencia de algunas de sus características que plantean inconvenientes para la restauración y la expansión de sus poblaciones, como por ejemplo, la fertilidad de los terrenos cultivados (Fresco, 1982; Pywell *et al.*, 1994; Roem & Berendse, 2000), el pastoreo (Basantia *et al.*, 1989; Canals & Sebastià, 2002) o la repoblación forestal (Nielsen *et al.*, 1999). Este esfuerzo continuado ha permitido evaluar diversas técnicas de manejo de muy distinta naturaleza para la mejora y expansión de estas comunidades desde las primeras propuestas de Marrs (1985). Las de mayor interés consisten en aumentar la ventaja competitiva de los brezos a nivel del sustrato edáfico extrayendo nutrientes del ecosistema a restaurar (Allison & Ausdemn, 2004, 2006; Mitchell *et al.*, 2000) y rebajando el pH del suelo (Lawson *et al.*, 2004).

Las relaciones entre la vegetación y las características del suelo pueden constituir una importante herramienta para la evaluación de algunos lugares (Turner & Kelly, 1981; Rastin, 1991; Silva-Pando *et al.*, 1993 en Zas & Alonso, 2002) debido a la frecuente asociación entre la presencia o ausencia de determinadas especies florísticas y determinadas características edáficas, por lo que dichas especies pueden ser utilizadas como bioindicadoras de ciertas condiciones de suelo (Zas & Alonso, 2002). Esta cuestión también ha sido abordada en esta Memoria en el Capítulo de los Hábitats asociando a cada especie (en base a los inventarios botánicos) las características genéricas de los suelos en los que se desarrollan. Así para los brezos gallegos se encuentran especies asociadas a suelos desarrollados sobre rocas básicas o ultrabásicas bien drenados (*Erica vagans*) o encharcados (*E. erigena*); en la región biogeográfica mediterránea especies con una reserva de agua edáfica todo el año en suelos de texturas finas (*E. scoparia*); en suelos encharcados casi todo el año, bien por topografía plana (*E. tetralix*) o por precipitaciones abundantes (*E. mackaiana*) y según disminuye el grado de hidromorfia aumenta la frecuencia de *E. ciliaris* con especie acompañante de las anteriores. Por espesor de suelo: en los esqueléticos (*E. umbellata* y *C. vulgaris*), aunque están en todo tipo de suelos; en los más profundos dentro de la orla forestal (*E. arborea*) o en condiciones más abiertas (*E. australis* y *E. scoparia*) y en suelos someros o de profundidad media (*E. cinerea* y *D. cantabrica*).

En este Capítulo se abordan en una primera parte las propiedades de los suelos de brezal considerados en la presente Memoria (Capítulo Material y Métodos) tomando como referencia los trabajos de Calvo de Anta *et al.* (1992) para la caracterización química de su reactividad (pH, CICE y materia orgánica). Para el análisis elemental se ha tenido en cuenta la reciente publicación sobre niveles genéricos de referencia de metales pesados en Galicia (Macías & Calvo, 2009), junto con las Tesis doctorales y otros trabajos realizados en el Departamento de Edafología y Química Agrícola de la USC. En la segunda parte se analizará la composición elemental de las 12 especies de brezo presentes en Galicia y finalmente se establecerán las posibles relaciones suelo-planta existentes.

## IV.2. PROPIEDADES DE LOS SUELOS DE BREZAL

Una vez terminada la fase analítica surge la cuestión sobre cómo abordar la información y para ello se someten los resultados a un análisis estadístico exploratorio previo con SPSS 15.0. Se aplica un análisis de Jerarquización o *Cluster*, para ver cómo se agrupan las muestras de los 34 brezales estudiados, tomando como variables sus propiedades químicas determinadas en el laboratorio. En este análisis estadístico a cada caso se le asignan los resultados promedio para cada especie (cepellón y rizosfera) en cada brezal (la nomenclatura seguida para las muestras se recoge en el Capítulo Material y Métodos).

El resultado de esta estadística de agrupación en forma de dendograma se recoge en la Figura IV.2 y los resultados fueron muy claros, de manera que, el principal factor que condiciona las propiedades de estos suelos es su material de partida. En primer lugar se separan los suelos orgánicos de los suelos minerales. En los minerales primero se diferencian los suelos sobre rocas ultrabásicas de otro conjunto formado por los suelos sobre rocas ácidas y básicas. En este último conjunto la primera dicotomía surge con los suelos sobre anfíbolitas de la mina de Touro, separados a una mayor distancia, y la segunda en los suelos desarrollados sobre sedimentos cuaternarios costeros, que se separan del resto de los suelos de brezal sobre rocas ácidas y básicas. A partir de aquí primero se agrupan los suelos sobre cuarcitas y finalmente quedan por un lado los granitos, pizarras y esquistos, y por otro, los suelos sobre gabros junto con una eclogita no serpentinizada.

En la Figura IV.2 también se muestra un cuadro síntesis del dendograma con los grupos (materiales de partida) definidos en base a este análisis estadístico exploratorio y dado que, a la vista de estos resultados, el primer factor que agrupa los suelos de brezal es el material de partida de los mismos, la discusión de los resultados se hará en base a este criterio. Por ser suficientemente numeroso el grupo formado por granitos, pizarras y esquistos (representa un tercio del total) se opta por separar cada uno de los materiales.

Así quedan, por tanto, 9 grupos de suelos de brezal que, ordenados alfabéticamente por materiales de partida, son: anfíbolitas de la mina de Touro (A); rocas básicas, fundamentalmente gabros (B); esquistos (Es), granitos (Gr), pizarras (P), cuarcitas (Q), sedimentos orgánicos (SO), sedimentos cuaternarios costeros (SQ) y rocas ultrabásicas (UB).

Otro factor en el que *a priori* se pensó como determinante de las propiedades de estos suelos, es el carácter rizosférico o no rizosférico de los mismos y para ver si realmente era así, se sometieron las 90 muestras de suelos a un análisis de varianza empleando el test de Tukey B para determinar los grupos homogéneos ( $p < 0.05$ ). Para la mayoría de las variables estudiadas no se encontraron diferencias significativas, excepto en lo que se refiere a los contenidos de C, N, H (materia orgánica). Este resultado se tendrá en cuenta a la hora de la discusión de estas propiedades en su apartado correspondiente.



### IV.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### IV.3.1. REACCIÓN DEL SUELO (ACTUAL Y POTENCIAL)

La medida de pH en distintas condiciones es importante para comprender el comportamiento de los suelos. El pH en agua refleja la acidez actual y el pH en KCl la acidez potencial cambiante en presencia de iones. Los suelos en estudio presentan reacción predominantemente ácida, típica de suelos de Galicia (Muñoz & Guitián, 1962). El valor medio de pH en agua para todo el conjunto es de  $5.06 \pm 0.61$ , con valores que oscilan entre un mínimo de 3.68 sobre granitos y un máximo de 6.55 en rocas ultrabásicas (Figura IV.3). Se ha hecho una ANOVA con Tukey B para establecer los distintos grupos que presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) y las secuencias obtenidas para las medias en función del material de partida son:

pH en agua: UB ( $5.83 \pm 0.38$ )<sup>c</sup>, SQ ( $5.81 \pm 0.14$ )<sup>c</sup> > B ( $5.25 \pm 0.45$ )<sup>b</sup>, Es ( $5.23 \pm 0.14$ )<sup>b</sup> > A ( $4.60 \pm 0.57$ )<sup>a</sup>, Gr ( $4.52 \pm 0.36$ )<sup>a</sup>, Q ( $4.25 \pm 0.10$ )<sup>a</sup>, P ( $4.20 \pm 0.29$ )<sup>a</sup>, SO ( $4.11 \pm 0.14$ )<sup>a</sup>

pH en KCl: UB ( $5.37 \pm 0.41$ )<sup>g</sup> ≥ SQ ( $5.09 \pm 0.27$ )<sup>gf</sup> ≥ B ( $4.66 \pm 0.51$ )<sup>fe</sup> ≥ Es ( $4.38 \pm 0.23$ )<sup>ed</sup> ≥ A ( $4.29 \pm 0.50$ )<sup>cdc</sup> ≥ P ( $3.96 \pm 0.09$ )<sup>dc</sup> ≥ Gr ( $3.83 \pm 0.28$ )<sup>cb</sup> ≥ Q ( $3.60 \pm 0.27$ )<sup>ba</sup> ≥ SO ( $3.11 \pm 0.06$ )<sup>a</sup>

Las letras supraíndice distintas indican la pertenencia a grupos significativamente diferentes para la propiedad analizada. Así para el pH en agua las rocas ultrabásicas y los sedimentos cuaternarios costeros están en el mismo grupo y tienen medias significativamente mayores que el grupo formado por las rocas básicas y los esquistos; todos ellos presentan medias significativamente mayores que los demás materiales (A, Gr, Q, P y SO) que pertenecen a un mismo grupo.

Los máximos valores se encuentran sobre rocas ultrabásicas y sedimentos cuaternarios costeros y los pHs promedio más ácidos los presentan los Histosoles. Tanto la secuencia como los resultados de este estudio están de acuerdo con los encontrados por Calvo *et al.* (1992) para suelos forestales y de matorral en Galicia. La excepción se encuentra en anfíbolitas, ya que en la presente Memoria esta litología se limita a los suelos de la mina de Touro, donde se superpone la influencia de la presencia irregular de sulfuros.

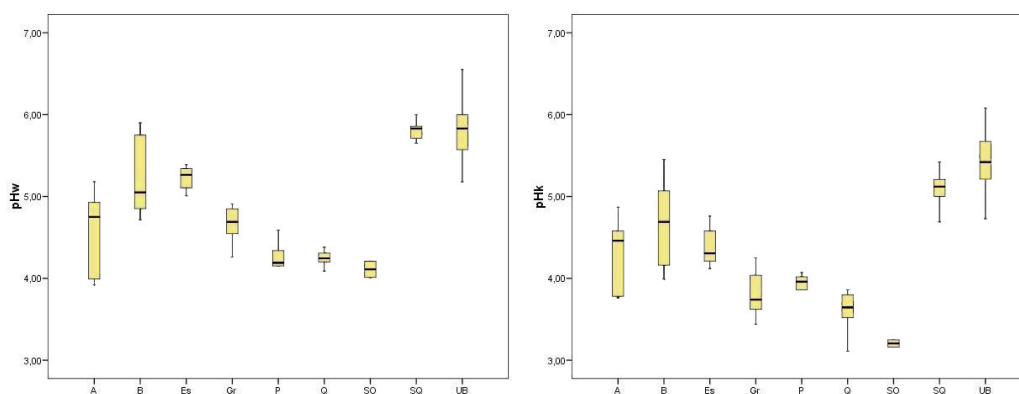


Figura IV.3. Diagrama de Cajas para el pH en agua y en KCl (mediana, rango intercuartílico, máximo y mínimo) en los suelos de brezal sobre distintos materiales de partida (A: Anfíbolitas de Touro, B: Rocas básicas, Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarcitas, SO: Sedimentos orgánicos, SQ: S. cuaternarios costeros y UB: Rocas ultrabásicas)



Si se comparan la reacción actual y potencial de estos suelos (Tabla IV.1 y Figura IV.3) se observa que en todos los casos el pH en KCl es menor que el pH en agua, como es habitual en suelos de Galicia. Esto pone de manifiesto el predominio de coloides con carga negativa en los suelos. El  $\Delta\text{pH} = \text{pH}(\text{H}_2\text{O}) - \text{pH}(\text{KCl})$  es, por tanto, siempre mayor que cero; la media de las diferencias para el conjunto de todos los suelos es de  $0.60 \pm 0.30$ , es decir, existe carga negativa dominante en el complejo de cambio y una elevada acidez potencial de los compuestos orgánicos.

Tabla IV.1. Media, mediana, desviación estándar, rango y cuartiles para los pHs en agua, KCl y NaF de los suelos de brezal de Galicia sobre diferentes materiales de partida

		pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	pH (NaF)		pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	pH (NaF)
<b>A</b>	nº muestras	6	6	6	<b>Q</b>	7	7	7
	<b>Media</b>	<b>4.55</b>	<b>4.29</b>	<b>9.83</b>		<b>4.25</b>	<b>3.60</b>	<b>7.37</b>
	Mediana	4.75	4.46	10.74		4.25	3.65	7.49
	<b>Desv. estándar</b>	<b>0.57</b>	<b>0.50</b>	<b>1.67</b>		<b>0.10</b>	<b>0.27</b>	<b>0.33</b>
	Mínimo	3.92	3.76	7.90		4.09	3.11	6.69
	Máximo	5.18	4.87	11.21		4.38	3.86	7.56
	Rango	1.26	1.11	3.31		0.29	0.75	0.87
	1º Cuartil	3.99	3.78	8.12		4.20	3.52	7.45
<b>B</b>	nº muestras	19	19	19	<b>SO</b>	4	4	4
	<b>Media</b>	<b>5.25</b>	<b>4.66</b>	<b>8.85</b>		<b>4.11</b>	<b>3.11</b>	<b>7.42</b>
	Mediana	5.05	4.69	8.46		4.11	3.09	7.42
	<b>Desv. estándar</b>	<b>0.45</b>	<b>0.51</b>	<b>1.15</b>		<b>0.14</b>	<b>0.06</b>	<b>0.04</b>
	Mínimo	4.72	3.99	7.42		4.01	3.16	7.39
	Máximo	5.90	5.45	10.92		4.21	3.25	7.44
	Rango	1.19	1.46	3.50		0.20	0.09	0.05
	1º Cuartil	4.85	4.16	7.90		4.01	3.25	7.44
<b>Es</b>	nº muestras	8	8	8	<b>SQ</b>	5	5	5
	<b>Media</b>	<b>5.23</b>	<b>4.38</b>	<b>9.82</b>		<b>5.81</b>	<b>5.09</b>	<b>7.59</b>
	Mediana	5.27	4.31	10.20		5.83	5.12	7.59
	<b>Desv. estándar</b>	<b>0.14</b>	<b>0.23</b>	<b>1.19</b>		<b>0.14</b>	<b>0.27</b>	<b>0.00</b>
	Mínimo	5.01	4.12	7.21		5.65	4.69	7.58
	Máximo	5.39	4.76	10.79		6.00	5.42	7.59
	Rango	0.38	0.64	3.58		0.35	0.73	0.01
	1º Cuartil	5.11	4.21	9.40		5.71	5.00	7.59
<b>Gr</b>	nº muestras	13	13	13	<b>UB</b>	22	22	22
	<b>Media</b>	<b>4.60</b>	<b>3.83</b>	<b>9.01</b>		<b>5.83</b>	<b>5.37</b>	<b>8.06</b>
	Mediana	4.69	3.74	8.72		5.83	5.42	8.06
	<b>Desv. estándar</b>	<b>0.36</b>	<b>0.28</b>	<b>1.35</b>		<b>0.38</b>	<b>0.41</b>	<b>0.46</b>
	Mínimo	3.68	3.44	7.57		5.18	4.30	7.53
	Máximo	4.91	4.25	10.91		6.55	6.08	9.03
	Rango	1.23	0.81	3.34		1.37	1.78	1.50
	1º Cuartil	4.55	3.62	7.73		5.57	5.21	7.61
<b>P</b>	nº muestras	6	6	6				
	<b>Media</b>	<b>4.20</b>	<b>3.96</b>	<b>7.70</b>				
	Mediana	4.19	3.96	7.69				
	<b>Desv. estándar</b>	<b>0.29</b>	<b>0.09</b>	<b>0.14</b>				
	Mínimo	3.72	3.86	7.55				
	Máximo	4.59	4.07	7.91				
	Rango	0.87	0.21	0.36				
	1º Cuartil	4.15	3.86	7.55				
	3º Cuartil	4.34	4.02	7.80				

A: Anfíbolitas (Touro)  
 B: Rocas básicas  
 Gr: Granitos  
 P: Pizarras  
 Q: Cuarzitas  
 SO: Sedimentos orgánicos  
 SQ: Sedimentos cuaternarios costeros  
 UB: Rocas ultrabásicas

## IV.3.2. pH EN NaF

El pH en fluoruro sódico (Fieldes & Perrot, 1966) se puede utilizar como un test para determinar la existencia de compuestos de bajo grado de orden reactivos en los suelos. Estos compuestos son propios de las fases incipientes de meteorización del suelo e indican la presencia de alofanos, complejos organoaluminicos, etc. y la existencia de propiedades ándicas. En la Tabla IV.1 se recogen los valores del pH en NaF para los distintos materiales de partida encontrándose la existencia de propiedades ándicas en los suelos sobre rocas básicas, anfíbolitas y esquistos, donde llega a haber suelos clasificados como Andosoles (IUSS, WRB, 2007).

## IV.3.3. CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA

En cuanto a los contenidos de materia orgánica por un lado están los suelos orgánicos con porcentajes medios de  $42.85 \pm 2.22$  % de C,  $2.22 \pm 0.13$  % de N,  $6.44 \pm 0.13$  % de H y  $19.9 \pm 2.0$  para la relación C/N; por otro lado está el conjunto de los suelos minerales con porcentajes medios de  $9.03 \pm 5.04$  % de C,  $0.56 \pm 0.33$  % de N,  $1.75 \pm 0.70$  % de H y  $16.2 \pm 2.7$  para la relación C/N. Estos últimos presentan el 50% de los valores centrales entre 5.46 y 11.70 % para el C y entre 0.32 y 0.71% para el N; con un amplio rango que va desde un mínimo de 1% de C y 0.07% de N en un Arenosol álbico sobre sedimentos cuaternarios costeros y un máximo de 20.4% de C y 1.28% de N en un Umbrisol cámbico sobre esquistos (Tabla IV.2 y Figura IV.4). Estos rangos son acordes con los encontrados por Calvo *et al.* (1992) para suelos forestales y de matorral en Galicia; sin embargo, los promedios del presente trabajo son más elevados debido a que en esta investigación se analiza el cepellón que rodea las raíces de cada planta, donde la concentración de materia orgánica es mayor.

Las secuencias obtenidas con el ANOVA con Tukey B para las medias de C y N de los suelos son, respectivamente:

$$SO (42.85 \pm 2.22)^c \gg P (13.25 \pm 3.14)^b \geq Es (10.49 \pm 5.04)^{ba}, Gr (8.93 \pm 7.20)^{ba}, B (8.57 \pm 4.80)^{ba}, UB (7.92 \pm 2.60)^{ba}, Q (7.11 \pm 1.63)^{ba}, A (6.18 \pm 5.52)^{ba} \geq SQ (4.20 \pm 2.68)^a$$

$$SO (2.22 \pm 0.13)^b \gg Es (0.66 \pm 0.33)^a, P (0.66 \pm 0.09)^a, B (0.53 \pm 0.34)^a, A (0.43 \pm 0.34)^a, (3.96 \pm 0.09)^a, Gr (0.60 \pm 0.52)^a, Q (0.35 \pm 0.08)^a, SQ (0.25 \pm 0.15)^a$$

Los valores de los suelos orgánicos son mucho más elevados que los de los suelos minerales y dentro de estos últimos para los porcentajes de C sólo existen diferencias significativas entre las pizarras, que presentan el promedio máximo, y los sedimentos cuaternarios costeros con el mínimo de todos los suelos estudiados.

En cuanto a la relación C/N los suelos desarrollados sobre pizarras ( $20.0 \pm 3.2$ )<sup>b</sup> y cuarcitas ( $20.2 \pm 1.3$ )<sup>a</sup> presentan relaciones C/N significativamente mayores. Los suelos orgánicos ( $19.9 \pm 2.0$ )<sup>b</sup> no se diferencian significativamente de los anteriores, aunque sí de los suelos sobre granitos ( $15.7 \pm 2.0$ )<sup>b</sup>, rocas ultrabásicas ( $14.3 \pm 2.2$ )<sup>b</sup> y anfibolitas ( $13.6 \pm 2.7$ )<sup>b</sup> que presentan las relaciones C/N más bajas. En suelos de pizarras, cuarcitas y sedimentos orgánicos se evidencia la acumulación de formas de C bruto (humus mor), una actividad biológica inferior a la potencialmente existente para las condiciones climáticas y además, los valores más bajos de N, siendo éste un factor limitante de la actividad mineralizadora. Valores intermedios, aunque sin diferencias significativas con ninguno de los anteriores, se encuentran en rocas básicas, sedimentos cuaternarios y esquistos con media de  $15.5 \pm 2.1$ , relaciones propias de los suelos distróficos con materia orgánica tipo moder o moder mulliforme. Sobre rocas ultrabásicas y anfibolitas de Touro y en las anfibolitas de Touro con rangos entre (10.8-16.9) y (8.7-18.6), respectivamente, se encuentra desde humus moder a formas de materia orgánica poco evolucionada, que deberían degradarse muy rápidamente, con nula o muy poca producción de humus; este último caso es propio de los ambientes oxidantes de los suelos de mina.

Tabla IV.2. Media, mediana, desviación estándar, rango y cuartiles para los contenidos de C, N, H y la relación C/N de los suelos sobre los distintos materiales de partida

		C [%]	N [%]	C/N	H [%]			C [%]	N [%]	C/N	H [%]
<b>A</b>	nº muestras	6	6	6	6	<b>Q</b>	7	7	7	7	
	<b>Media</b>	<b>6.18</b>	<b>0.43</b>	<b>13.6</b>	<b>1.51</b>		<b>7.11</b>	<b>0.35</b>	<b>20.2</b>	<b>0.93</b>	
	Mediana	5.48	0.49	13.6	1.96		6.87	0.33	20.3	0.82	
	<b>Desv. estándar</b>	<b>5.52</b>	<b>0.34</b>	<b>2.7</b>	<b>0.64</b>		<b>1.63</b>	<b>0.08</b>	<b>1.3</b>	<b>0.35</b>	
	Mínimo	1.00	0.09	10.8	0.74		5.50	0.25	18.1	0.69	
	Máximo	14.22	0.84	16.9	1.99		10.03	0.50	21.6	1.61	
	Rango	13.22	0.75	6.2	1.25		4.53	0.25	3.6	0.92	
	1º Cuartil	1.40	0.09	11.2	0.90		5.78	0.32	19.7	0.71	
	3º Cuartil	8.81	0.65	15.6	1.98		7.61	0.39	21.6	0.95	
<b>B</b>	nº muestras	19	19	19	19	<b>SO</b>	4	4	4	4	
	<b>Media</b>	<b>8.57</b>	<b>0.53</b>	<b>16.7</b>	<b>2.01</b>		<b>42.85</b>	<b>2.22</b>	<b>19.9</b>	<b>6.44</b>	
	Mediana	7.89	0.45	16.4	2.12		42.55	2.25	20.1	6.44	
	<b>Desv. estándar</b>	<b>4.80</b>	<b>0.34</b>	<b>2.1</b>	<b>0.59</b>		<b>1.02</b>	<b>0.13</b>	<b>2.0</b>	<b>0.13</b>	
	Mínimo	3.05	0.19	14.0	1.13		41.97	2.06	18.2	6.31	
	Máximo	17.86	1.17	21.3	3.09		44.33	2.34	21.5	6.58	
	Rango	14.81	0.98	7.3	1.96		2.36	0.28	3.3	0.27	
	1º Cuartil	4.57	0.26	15.3	1.39		41.97	2.06	18.6	6.54	
	3º Cuartil	11.24	0.72	17.9	2.41		44.33	2.25	21.5	6.58	
<b>Es</b>	nº muestras	8	8	8	8.00	<b>SQ</b>	5	5	5	5	
	<b>Media</b>	<b>10.49</b>	<b>0.66</b>	<b>16.0</b>	<b>1.94</b>		<b>4.20</b>	<b>0.25</b>	<b>16.0</b>	<b>0.66</b>	
	Mediana	9.13	0.54	16.1	1.74		3.60	0.23	15.7	0.60	
	<b>Desv. estándar</b>	<b>5.04</b>	<b>0.33</b>	<b>0.7</b>	<b>0.77</b>		<b>2.68</b>	<b>0.15</b>	<b>1.1</b>	<b>0.42</b>	
	Mínimo	5.90	0.38	14.8	1.24		1.11	0.07	14.8	0.16	
	Máximo	20.41	1.28	17.1	3.49		7.30	0.42	17.4	1.25	
	Rango	14.51	0.90	2.3	2.25		6.19	0.35	2.6	1.09	
	1º Cuartil	6.96	0.43	15.7	1.37		2.36	0.16	15.4	0.41	
	3º Cuartil	12.72	0.84	16.5	2.28		6.63	0.39	17.0	0.89	

Gr	nº muestras	13	13	13	13	UB	22	22	22	22
<b>Media</b>		<b>8.93</b>	<b>0.60</b>	<b>15.7</b>	<b>1.60</b>	<b>7.92</b>	<b>0.57</b>	<b>14.3</b>	<b>1.74</b>	
Mediana		7.50	0.43	15.3	1.30	8.65	0.59	14.2	1.57	
<b>Desv. estándar</b>		<b>7.20</b>	<b>0.52</b>	<b>2.0</b>	<b>0.75</b>	<b>2.60</b>	<b>0.18</b>	<b>2.2</b>	<b>0.51</b>	
Mínimo		1.07	0.06	13.5	0.82	2.61	0.14	8.7	0.91	
Máximo		20.25	1.40	18.7	2.96	13.83	0.92	18.6	3.18	
Rango		19.18	1.34	5.1	2.14	11.22	0.78	9.9	2.27	
1º Cuartil		2.40	0.14	14.1	0.94	6.39	0.46	13.5	1.45	
3º Cuartil		14.68	1.03	17.6	2.25	8.99	0.69	15.4	1.92	
<b>P</b>	<b>nº muestras</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>A: Anfibolitas (Touro)</b>				
<b>Media</b>		<b>13.25</b>	<b>0.66</b>	<b>20.0</b>	<b>2.10</b>	<b>B: Rocas básicas</b>				
Mediana		14.11	0.67	21.6	2.14	<b>Es: Esquistos</b>				
<b>Desv. estándar</b>		<b>3.14</b>	<b>0.09</b>	<b>3.2</b>	<b>0.23</b>	<b>Gr: Granitos</b>				
Mínimo		8.79	0.49	14.5	1.76	<b>P: Pizarras</b>				
Máximo		17.29	0.76	22.8	2.42	<b>Q: Cuarcitas</b>				
Rango		8.50	0.27	8.3	0.66	<b>SO: Sedimentos orgánicos</b>				
1º Cuartil		10.30	0.65	17.9	1.93	<b>SQ: Sedimentos cuaternarios costeros</b>				
3º Cuartil		14.91	0.71	21.8	2.17	<b>UB: Rocas ultrabásicas</b>				

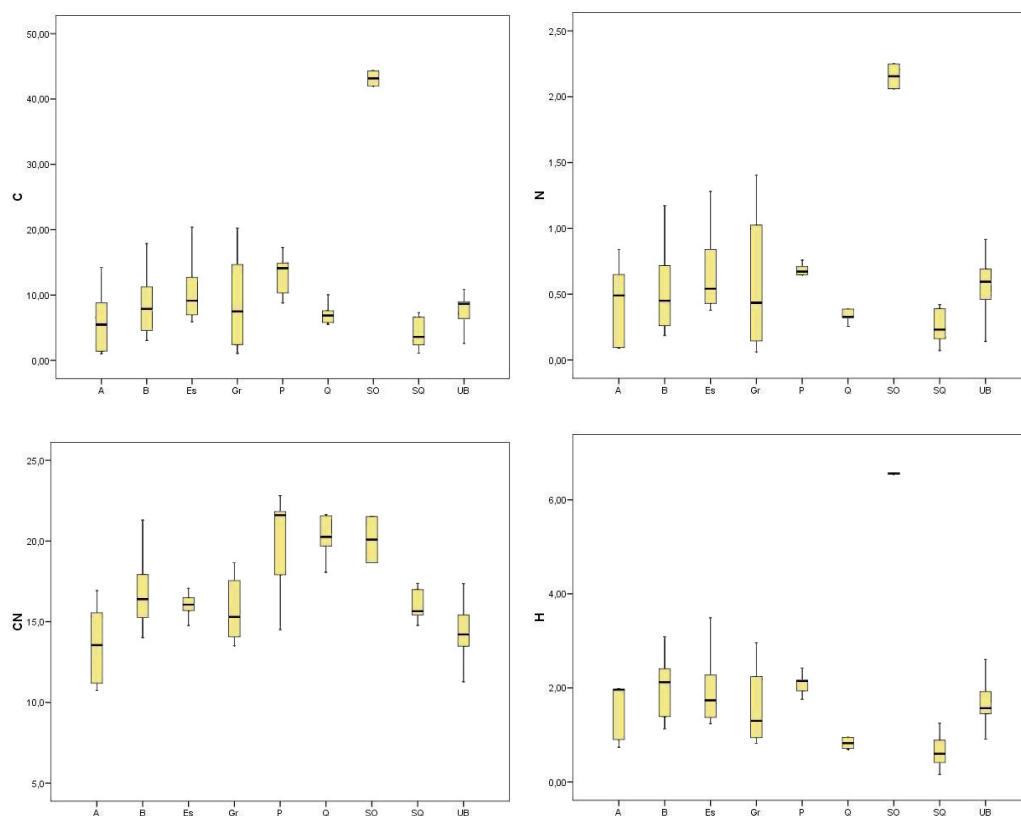


Figura IV.4. Diagrama de Cajas para los porcentajes de C, N, H y relación C/N (mediana, rango intercuartílico, máximo y mínimo) en los suelos sobre distintos materiales de partida (A: Anfibolitas de Touro, B: Rocas básicas, Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarcitas, SO: Sedimentos orgánicos, SQ: S. cuaternarios costeros y UB: Rocas ultrabásicas).

En resumen, estos suelos presentan en general, contenidos medios elevados de materia orgánica tipo moder o moder mulliforme y según la relación C/N la mayor parte de los suelos de brezal estudiados poseen una buena actividad biológica.

Al comparar los resultados entre las muestras de rizosfera y las muestras de cepellón correspondientes (Tabla IV.3) se obtienen diferencias significativas para los contenidos de C y N totales sólo en el caso de los esquistos y las rocas ultrabásicas. Como era de esperar los porcentajes de C y N son superiores en el suelo rizosférico y en comparación con el cepellón. Para rocas básicas, pizarras y cuarcitas, las diferencias no son significativas según el carácter del suelo sea rizosférico o no. Esto puede deberse a que no siempre ha sido posible recoger las muestras en las adecuadas condiciones de humedad que aseguren una buena separación de la rizosfera, ya que otros autores sí encuentran diferencias en suelos forestales (Camps *et. al.*, 2003). Los suelos sobre anfíbolitas, granitos y sedimentos orgánicos no se consideran en la comparativa con el cepellón por el escaso número de muestras de rizosfera obtenidas.

Tabla IV.3. Porcentaje medio de C, N y relación C/N en rizosfera y cepellón para distintos materiales

	N rizosferas	N total muestras	% C rizosfera	% C cepellón	% N rizosfera	% N cepellón
UB	8	22	<b>9.72±2.11</b>	<b>7.14±2.29</b>	0.63±0.15	0.52±0.17
B	8	19	9.18±5.67	8.94±4.81	0.58±0.40	0.53±0.35
Es	4	8	<b>13.63±5.51</b>	<b>7.34±1.62</b>	<b>0.86±0.38</b>	<b>0.46±0.10</b>
P	2	6	16.10±1.68	11.82±2.70	0.72±0.05	0.63±0.09
Q	3	7	10.27±5.15	7.01±2.08	0.52±0.30	0.35±0.10

En negrita se señalan las diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) para el carácter rizosférico del suelo (B: Rocas básicas, Es: Esquistos, P: Pizarras, Q: Cuarcitas, y UB: Rocas ultrabásicas).

#### IV.3.4. FÓSFORO

La concentración media de fósforo asimilable para todos los suelos es de  $4.13 \pm 2.04 \text{ mg kg}^{-1}$  con un rango que varía entre 0.83 sobre rocas básicas y  $10.65 \text{ mg kg}^{-1}$  sobre cuarcitas. La secuencia obtenida con el ANOVA con Tukey B en función del material de partida es, en  $\text{mg kg}^{-1}$ :

$$Q (5.93 \pm 2.94)^c \geq Es (5.34 \pm 2.17)^{cb}, SO (4.98 \pm 1.45)^{cb} \geq UB (4.58 \pm 2.14)^{cba}, Gr (4.46 \pm 0.93)^{cba}, P (4.08 \pm 1.65)^{cba}, SQ (3.89 \pm 0.73)^{cba} \geq B (2.84 \pm 1.17)^{ba} \geq A (1.66 \pm 0.16)^a$$

Las concentraciones medias más elevadas están en los suelos de cuarcitas, que se diferencian significativamente de los de rocas básicas y anfíbolitas; estos últimos tienen las medias más bajas de todos los materiales. Los esquistos y los sedimentos orgánicos presentan medias significativamente más elevadas que las anfíbolitas, y no se diferencian significativamente de los demás materiales. Los datos obtenidos en este estudio son acordes a los de Calvo *et al.* (1992) ya que los niveles de P en suelos no cultivados de Galicia en su mayoría son muy deficientes (menos de  $5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) o bajos (entre 5 y  $10 \text{ mg kg}^{-1}$ ) según la clasificación FAO (1980). En este caso los suelos sobre anfíbolitas, rocas básicas y sedimentos cuaternarios costeros presentan valores muy deficientes, mientras que los suelos sobre los demás materiales varían entre muy deficientes y bajos (Figura IV.5 y Tabla IV.4).

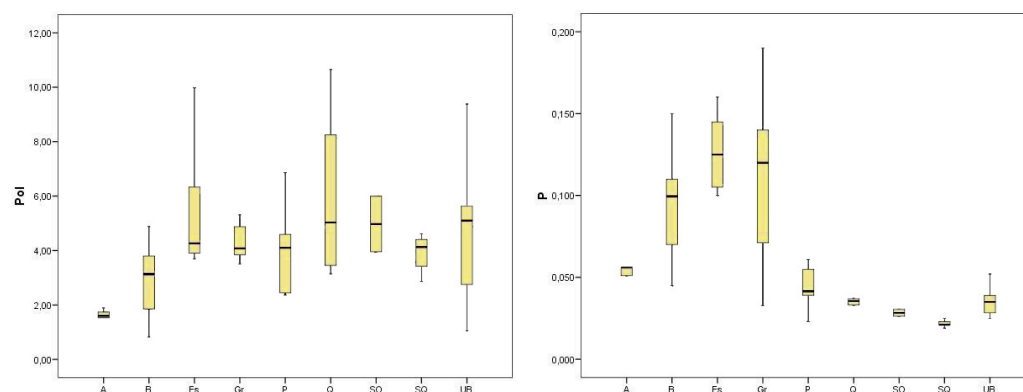


Figura IV.5. Diagrama de Cajas para las concentraciones de P asimilable ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) y P total (%) (mediana, rango intercuartílico, máximo y mínimo) en los suelos de brezal sobre distintos materiales de partida (A: Anfibolitas de Touro, B: Rocas básicas, Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarzitas, SO: Sedimentos orgánicos, SQ: Sedimentos cuaternarios costeros y UB: Rocas ultrabásicas).

En lo que se refiere a las concentraciones de P total la media de fósforo para todos los suelos es de  $656 \pm 425 \text{ mg kg}^{-1}$  con un rango que varía entre un mínimo de  $190 \text{ mg kg}^{-1}$  sobre cuarzitas y sedimentos cuarcíticos y un máximo de  $1900 \text{ mg kg}^{-1}$  sobre granitos. La secuencia obtenida con el ANOVA con Tukey B en función del material de partida es en  $\text{mg kg}^{-1}$ :

$$\text{Es } (1260 \pm 230)^b, \text{ Gr } (1090 \pm 500)^b, \text{ B } (960 \pm 270)^b > \text{A } (530 \pm 190)^a, \text{ P } (440 \pm 130)^a, \text{ Q } (400 \pm 210)^a, \text{ UB } (360 \pm 80)^a, \text{ SO } (280 \pm 30)^a, \text{ SQ } (220 \pm 20)^a$$

Tabla IV.4. Media, mediana, desviación estándar, rango y cuartiles para las concentraciones de P asimilable y P total. [ $\text{mg kg}^{-1}$ ] de los suelos sobre los distintos materiales de partida

(mg kg <sup>-1</sup> )				(mg kg <sup>-1</sup> )			
P		P total		P		P total	
A	nº muestras	6	6	Q	nº muestras	7	7
	<b>Media</b>	<b>1.66</b>	<b>528</b>		<b>Media</b>	<b>5.93</b>	<b>400</b>
	Mediana	1.60	560		Mediana	5.03	355
	Varianza	0.02	4		Varianza	8.63	4
	<b>D. estándar</b>	<b>0.16</b>	<b>190</b>		<b>D. estándar</b>	<b>2.94</b>	<b>207</b>
	Mínimo	1.53	240		Mínimo	3.15	190
	Máximo	1.89	770		Máximo	10.65	800
	Rango	0.36	530		Rango	7.50	610
	Amplitud	0.29	290		Amplitud	5.48	183
	1º Cuartil	1.53	510		1º Cuartil	3.45	330
	3º Cuartil	1.74	560		3º Cuartil	8.25	370
B	nº muestras	19	19	SO	nº muestras	4	4
	<b>Media</b>	<b>2.84</b>	<b>962</b>		<b>Media</b>	<b>4.98</b>	<b>284</b>
	Mediana	3.14	995		Mediana	4.98	284
	Varianza	1.36	7		Varianza	2.10	0
	<b>D. estándar</b>	<b>1.17</b>	<b>269</b>		<b>D. estándar</b>	<b>1.45</b>	<b>30</b>
	Mínimo	0.83	450		Mínimo	3.95	253
	Máximo	4.88	1500		Máximo	6.31	333
	Rango	4.05	1050		Rango	2.36	80
	Amplitud	2.04	400		Amplitud	2.05	43
	1º Cuartil	1.85	700		1º Cuartil	3.95	262
	3º Cuartil	3.80	1100		3º Cuartil	6.00	305

<b>Es</b>	n° muestras	8	8	<b>SQ</b>	n° muestras	5	5
	<b>Media</b>	<b>5.34</b>	<b>1263</b>		<b>Media</b>	<b>3.89</b>	<b>218</b>
	Mediana	4.27	1250		Mediana	4.13	210
	Varianza	4.69	5		Varianza	0.54	0
	<b>D. estándar</b>	<b>2.17</b>	<b>226</b>		<b>D. estándar</b>	<b>0.73</b>	<b>23</b>
	Mínimo	3.70	1000		Mínimo	2.86	190
	Máximo	9.98	1600		Máximo	4.62	250
	Rango	6.28	600		Rango	1.76	60
	Amplitud	2.61	450		Amplitud	1.38	40
	1° Cuartil	3.91	1050		1° Cuartil	3.42	210
	3° Cuartil	6.34	1450		3° Cuartil	4.41	230
<b>Gr</b>	n° muestras	13	13	<b>UB</b>	n° muestras	22	22
	<b>Media</b>	<b>4.46</b>	<b>1091</b>		<b>Media</b>	<b>4.58</b>	<b>355</b>
	Mediana	4.08	1200		Mediana	5.10	350
	Varianza	0.86	25		Varianza	4.59	1
	<b>D. estándar</b>	<b>0.93</b>	<b>498</b>		<b>D. estándar</b>	<b>2.14</b>	<b>79</b>
	Mínimo	3.51	329		Mínimo	1.06	250
	Máximo	6.66	1900		Máximo	9.38	520
	Rango	3.15	1571		Rango	8.32	270
	Amplitud	1.21	880		Amplitud	2.99	110
	1° Cuartil	3.85	710		1° Cuartil	2.75	283
	3° Cuartil	4.88	1400		3° Cuartil	5.64	390
<b>P</b>	n° muestras	6	6	A: Anfibolitas B: Rocas básicas Es: Esquistos Gr: Granitos P: Pizarras Q: Cuarcitas SO: Sedimentos orgánicos SQ: Sedimentos cuaternarios coste- UB: Rocas ultrabásicas			
	<b>Media</b>	<b>4.08</b>	<b>435</b>				
	Mediana	4.10	415				
	Varianza	2.73	2				
	<b>D. estándar</b>	<b>1.65</b>	<b>133</b>				
	Mínimo	2.37	230				
	Máximo	6.86	610				
	Rango	4.49	380				
	Amplitud	2.74	215				
	1° Cuartil	2.44	390				
	3° Cuartil	4.60	550				

Es decir, existen 2 grupos: uno formado por los esquistos, granitos y rocas básicas, que presentan medias significativamente mayores que los demás. Estos últimos forman un único grupo, en el que los valores más bajos están en los sedimentos cuaternarios costeros. Esta secuencia es coherente con la mineralogía de los suelos sobre estos materiales y está ligado al apatito, que aparece más frecuentemente en suelos de rocas de ácidas como granitos y esquistos.

#### IV.3.5. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO

La CICE es en general baja (Tabla IV.5), siendo el promedio para todos los suelos de  $8.94 \pm 5.87 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ , pero con una gran variabilidad: los valores oscilan entre un mínimo de  $1.65 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$  en las anfibolitas de Touro y un máximo sobre serpentinitas de  $36.02 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$  (siendo este último dato de rocas ultrabásicas un caso extremo, ya que el percentil 90 está en  $23.24 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ ). El 50% de los datos centrales para todos los suelos están entre 5.18 y  $10.54 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$  y la secuencia obtenida con el análisis de varianza es en  $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$

$$\text{UB} (16.06 \pm 7.13)^c \geq \text{SO} (12.82 \pm 0.85)^{cb} \geq \text{P} (9.09 \pm 2.91)^{cba} \geq \text{SQ} (7.47 \pm 5.24)^{ba}, \text{Es} (6.81 \pm 2.55)^{ba}, \text{B} (6.38 \pm 2.13)^{ba}, \text{Gr} (6.38 \pm 3.03)^{ba}, \text{Q} (5.58 \pm 0.84)^{ba} \geq \text{A} (3.91 \pm 1.81)^a$$

El valor medio más elevado de la CICE lo presentan los suelos sobre rocas ultrabásicas que no se diferencian significativamente de los sedimentos orgánicos y las pizarras, pero sí de los demás. El grupo con las medias más bajas corresponde a los suelos sobre anfíbolitas de la mina de Touro, que se diferencian significativamente de los tres ya señalados. Los sedimentos orgánicos sólo presentan medias significativamente mayores que las anfíbolitas y los demás materiales no se diferencian entre sí.

Estos resultados están de acuerdo con los encontrados por Calvo *et al.* (1992) y las diferencias entre los suelos son debidas sobre todo a los contenidos de materia orgánica y no al propio material de partida. En el caso de las serpentinitas, sin embargo posee más peso la naturaleza del propio material que el contenido de materia orgánica. En las anfíbolitas de la mina de Touro los bajos contenidos de materia orgánica unidos al proceso de destrucción mineral que han sufrido estos suelos son los responsables de que presenten los valores más bajos de la CICE, pese al proceso de recuperación ambiental al que están sometidos en la actualidad.

En la Figura IV.6. puede observarse las diferencias existentes en los suelos en cuanto a la capacidad y composición del complejo de intercambio, con medias de CICE que oscilan entre 3.43 cmol(+) kg<sup>-1</sup> en las anfíbolitas de Touro y 16.05 cmol(+) kg<sup>-1</sup> sobre rocas ultrabásicas. Los suelos que presentan su complejo de cambio saturado en Al, con porcentajes superiores al 50%, están sobre anfíbolitas, granitos, pizarras y cuarcitas; el valor medio más elevado lo presentan los suelos de granitos con un 64%; valores intermedios se encuentran en los sedimentos orgánicos, los esquistos y las rocas básicas, con porcentajes entre el 30 y el 40%.

En contraste, los suelos sobre rocas ultrabásicas y sedimentos cuaternarios costeros tienen su complejo de cambio saturado en bases, con porcentajes superiores al 97%, del cual un 65% corresponde al Mg (10.48 ± 5.80 cmol(+) kg<sup>-1</sup>) en rocas ultrabásicas.

Los suelos sobre sedimentos cuaternarios costeros tienen en torno a un 80% de la CICE saturada en Ca y Mg (2.61 ± 1.66 y 3.50 ± 2.91 cmol(+) kg<sup>-1</sup>, respectivamente). Sobresalen los máximos de Na de estos suelos con saturaciones del 11% (0.85 ± 0.51 cmol(+) kg<sup>-1</sup>), seguidos de los sedimentos orgánicos (0.79 ± 0.51 cmol(+) kg<sup>-1</sup>), ambos por su localización, los primeros en la costa y los segundos en la Sierra del Xistral en zona de exposición a los vientos de componente Norte provenientes del Cantábrico.



Tabla IV.5. Media, mediana, desviación estándar, rango y cuartiles para la capacidad de intercambio iónico de los suelos (cmol(+) kg<sup>-1</sup>) sobre los distintos materiales de partida

		cmol(+) kg <sup>-1</sup>						[%]	
		Al <sub>e</sub>	Ca <sub>e</sub>	Mg <sub>e</sub>	Na <sub>e</sub>	K <sub>e</sub>	SB	CIC <sub>e</sub>	Sat Al
<b>A</b> n=5	<b>Media</b>	<b>2.24</b>	<b>0.25</b>	<b>0.48</b>	<b>0.21</b>	<b>0.12</b>	<b>1.53</b>	<b>3.91</b>	<b>52.0</b>
	Mediana	2.42	0.70	0.47	0.19	0.09	1.64	4.64	52.2
	<b>D. estándar</b>	<b>1.44</b>	<b>0.29</b>	<b>0.11</b>	<b>0.07</b>	<b>0.06</b>	<b>0.36</b>	<b>1.81</b>	<b>16.4</b>
	Mínimo	0.42	0.48	0.37	0.15	0.06	1.13	1.65	25.5
	Máximo	3.96	1.20	0.66	0.33	0.21	1.98	5.84	67.8
	Rango	3.54	0.72	0.29	0.18	0.15	0.85	4.19	42.4
	1º Cuartil	1.21	0.50	0.42	0.16	0.08	1.21	2.35	51.5
<b>B</b> n=18	<b>Media</b>	<b>1.69</b>	<b>2.58</b>	<b>1.21</b>	<b>0.41</b>	<b>0.28</b>	<b>4.48</b>	<b>6.38</b>	<b>32.8</b>
	Mediana	0.93	1.48	0.92	0.40	0.25	3.40	6.06	23.0
	<b>D. estándar</b>	<b>1.78</b>	<b>2.36</b>	<b>1.07</b>	<b>0.12</b>	<b>0.12</b>	<b>3.48</b>	<b>2.13</b>	<b>32.7</b>
	Mínimo	0.07	0.28	0.15	0.21	0.17	0.88	3.39	0.7
	Máximo	4.97	7.38	2.86	0.70	0.59	10.94	11.02	72.2
	Rango	4.90	7.10	2.71	0.49	0.42	10.06	7.62	71.5
	1º Cuartil	0.10	0.52	0.22	0.33	0.22	1.40	4.70	1.4
<b>Es</b> n=8	<b>Media</b>	<b>1.62</b>	<b>3.04</b>	<b>1.08</b>	<b>0.35</b>	<b>0.41</b>	<b>4.89</b>	<b>6.81</b>	<b>27.8</b>
	Mediana	1.74	1.95	1.06	0.38	0.36	3.66	6.10	31.5
	<b>D. estándar</b>	<b>0.97</b>	<b>2.54</b>	<b>0.69</b>	<b>0.17</b>	<b>0.16</b>	<b>3.14</b>	<b>2.55</b>	<b>19.0</b>
	Mínimo	0.37	1.23	0.32	0.10	0.26	2.01	4.53	5.2
	Máximo	2.94	8.91	1.94	0.52	0.67	11.59	12.70	48.9
	Rango	2.57	7.68	1.62	0.42	0.41	9.57	8.17	43.6
	1º Cuartil	0.69	1.61	0.43	0.20	0.27	2.84	5.53	7.6
<b>Gr</b> n=11	<b>Media</b>	<b>3.97</b>	<b>0.72</b>	<b>0.54</b>	<b>0.29</b>	<b>0.22</b>	<b>1.77</b>	<b>6.38</b>	<b>64.2</b>
	Mediana	3.80	0.42	0.36	0.30	0.19	1.15	6.16	68.8
	<b>D. estándar</b>	<b>1.99</b>	<b>0.69</b>	<b>0.35</b>	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>	<b>1.32</b>	<b>3.03</b>	<b>13.0</b>
	Mínimo	1.83	0.10	0.19	0.10	0.07	0.46	2.66	39.5
	Máximo	7.93	2.05	1.15	0.51	0.50	4.21	10.27	83.9
	Rango	6.10	1.95	0.96	0.41	0.43	3.75	7.61	44.4
	1º Cuartil	2.48	0.17	0.26	0.16	0.10	0.68	3.39	54.9
<b>P</b> n=6	<b>Media</b>	<b>4.51</b>	<b>1.94</b>	<b>0.89</b>	<b>0.43</b>	<b>0.42</b>	<b>3.68</b>	<b>9.09</b>	<b>48.9</b>
	Mediana	4.87	1.86	0.83	0.41	0.37	3.50	9.44	50.8
	<b>D. estándar</b>	<b>1.57</b>	<b>1.21</b>	<b>0.24</b>	<b>0.10</b>	<b>0.15</b>	<b>1.50</b>	<b>2.91</b>	<b>6.9</b>
	Mínimo	1.51	0.73	0.58	0.30	0.28	2.10	3.77	40.0
	Máximo	6.02	4.15	1.25	0.58	0.66	6.47	12.44	56.7
	Rango	4.52	3.42	0.67	0.28	0.38	4.36	8.67	16.7
	1º Cuartil	4.50	0.97	0.75	0.38	0.29	2.74	8.82	41.3
<b>Q</b> n=6	<b>Media</b>	<b>3.02</b>	<b>0.89</b>	<b>0.34</b>	<b>0.20</b>	<b>0.31</b>	<b>1.74</b>	<b>5.58</b>	<b>53.8</b>
	Mediana	2.91	1.08	0.33	0.19	0.20	1.85	5.32	52.3
	<b>D. estándar</b>	<b>0.72</b>	<b>0.38</b>	<b>0.02</b>	<b>0.02</b>	<b>0.22</b>	<b>0.53</b>	<b>0.84</b>	<b>8.9</b>
	Mínimo	2.31	0.36	0.31	0.17	0.13	1.01	4.77	43.6
	Máximo	3.83	1.21	0.37	0.23	0.63	2.40	6.81	67.5
	Rango	1.52	0.85	0.06	0.06	0.50	1.39	2.04	23.9
	1º Cuartil	2.36	0.45	0.33	0.18	0.14	1.22	4.86	47.8
<b>SO</b> n=2	<b>Media</b>	<b>4.90</b>	<b>3.12</b>	<b>2.67</b>	<b>0.79</b>	<b>0.51</b>	<b>7.08</b>	<b>12.82</b>	<b>39.0</b>
	<b>D. estándar</b>	<b>2.89</b>	<b>1.93</b>	<b>1.06</b>	<b>0.03</b>	<b>0.01</b>	<b>2.97</b>	<b>0.85</b>	<b>25.1</b>
	Mínimo	2.85	1.76	1.92	0.77	0.50	4.98	12.22	21.2
	Máximo	6.94	4.48	3.42	0.81	0.52	9.18	13.42	56.8
	Rango	4.09	2.72	1.50	0.04	0.02	4.20	1.20	35.5
	<b>Media</b>	<b>0.13</b>	<b>2.61</b>	<b>3.50</b>	<b>0.85</b>	<b>0.32</b>	<b>7.28</b>	<b>7.47</b>	<b>4.6</b>
	Mediana	0.06	2.10	2.08	0.77	0.15	5.10	5.24	1.2
<b>SQ</b> n=5	<b>D. estándar</b>	<b>0.13</b>	<b>1.66</b>	<b>2.91</b>	<b>0.51</b>	<b>0.29</b>	<b>5.34</b>	<b>5.24</b>	<b>6.9</b>
	Mínimo	0.02	0.83	0.50	0.15	0.06	1.55	1.89	0.2
	Máximo	0.31	4.52	6.67	1.48	0.64	13.21	13.28	16.4
	Rango	0.28	3.69	6.17	1.33	0.57	11.66	11.39	16.2
	1º Cuartil	0.04	1.39	1.67	0.67	0.13	3.85	4.12	0.3
	3º Cuartil	0.21	4.20	6.58	1.19	0.63	12.69	12.84	5.1
<b>UB</b> n=19	<b>Media</b>	<b>0.25</b>	<b>4.40</b>	<b>10.48</b>	<b>0.51</b>	<b>0.38</b>	<b>15.77</b>	<b>16.06</b>	<b>3.3</b>
	Mediana	0.05	4.20	9.58	0.43	0.32	16.62	16.73	0.4
	<b>D. estándar</b>	<b>0.56</b>	<b>2.12</b>	<b>5.80</b>	<b>0.25</b>	<b>0.23</b>	<b>7.42</b>	<b>7.13</b>	<b>10.4</b>
	Mínimo	0.01	1.09	1.17	0.21	0.14	2.91	5.45	0.0
	Máximo	2.51	9.60	25.67	1.25	1.05	36.01	36.02	46.0
	Rango	2.50	8.51	24.50	1.04	0.90	33.11	30.57	45.9
	1º Cuartil	3.98	3.11	6.67	0.39	0.24	10.18	10.42	0.1
	3º Cuartil	0.02	5.24	13.00	0.54	0.39	19.22	19.23	2.3

Capacidad de Intercambio catiónica efectiva (CICe), suma de cationes básicos (SBe): Ca+Mg+Na+K extraídos con NH<sub>4</sub>Cl y suma de cationes ácidos (SCA) intercambiables: Al+H extraídos con KCl.; SAl= % saturación de Al del complejo de cambio de los suelos sobre distintos materiales (A: Anfibolitas de Touro, B: Rocas básicas, Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarcitas, SO: Sedimentos orgánicos, SQ: Sedimentos cuaternarios costeros y UB: Rocas ultrabásicas).

Como se ha visto los suelos de brezal tienen en general, elevados contenidos de materia orgánica, lo que se refleja también en la saturación de protones del complejo de intercambio. Porcentajes medios del 10% se encuentran en los suelos de granitos ( $0.64 \pm 0.25 \text{ cmol}(+) \text{ H}^+ \text{ kg}^{-1}$ ), cuarcitas ( $0.83 \pm 0.36 \text{ cmol}(+) \text{ H}^+ \text{ kg}^{-1}$ ) y pizarras ( $0.93 \pm 0.45 \text{ cmol}(+) \text{ H}^+ \text{ kg}^{-1}$ ). En torno al 4 % están sobre anfibolitas ( $0.13 \pm 0.07 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ ), rocas básicas ( $0.21 \pm 0.12 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ ), esquistos ( $0.27 \pm 0.13 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ ), y sedimentos orgánicos ( $0.06 \pm 0.02 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ ). Los suelos con saturaciones inferiores al 1% están sobre sedimentos cuaternarios costeros ( $0.06 \pm 0.021 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ ) y rocas ultrabásicas ( $0.03 \pm 0.02 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ ), en consonancia con sus menores contenidos de materia orgánica.

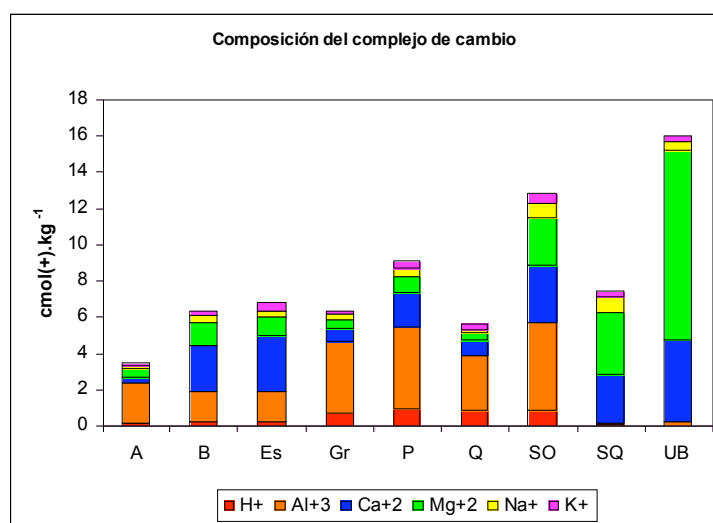


Figura IV.6. Composición media del complejo de cambio de los suelos de brezal sobre distintos materiales de partida (A: Anfibolitas de Touro, B: Rocas básicas, Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarcitas, SO: Sedimentos orgánicos, SQ: Sedimentos cuaternarios costeros y UB: Rocas ultrabásicas)

Para evaluar la fertilidad que presentan los suelos de brezal desde el punto de vista agronómico se ha aplicado el método propuesto por Macías & Calvo (1983). Estos autores toman como base la clasificación de Buol *et al.* (1975) (Soil Fertility Capability Classification) adaptándola a los suelos de Galicia. En la presente Memoria se aplica este método considerando las propiedades químicas que afectan a la fertilidad de los suelos, de donde resultan los siguientes **factores intrínsecos**:

- **Carácter álico (factor *a*):** Se aplica cuando el porcentaje de saturación en Al del complejo de cambio es mayor al 60% y acidez de media a baja (factor *h*) si este porcentaje se sitúa entre el 20 y el 60 %.
- **Fuerte déficit de fósforo (factor *P*):** si el P asimilable (Olsen *et al.*, 1965) es inferior a 5  $\text{mg kg}^{-1}$ .
- **Bajo contenido de K (factor *k*<sub>1</sub>):** si la concentración de K es menor de 0.2  $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$  en el CIC y factor *k*<sub>2</sub> si existe un fuerte desequilibrio entre el K y las otras bases (representando menos del 2% de la suma de bases).
- **Deficiencia de Ca (factor *Ca*<sub>1</sub>):** cuando la concentración de Ca en el CIC es menor de 1.5  $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$  (normalmente asociada a la presencia de factores *a* o *h*) y *Ca*<sub>2</sub> cuando la relación Ca/Mg es menor de 0.5 (suelos hipermagnésicos en rocas ultrabásicas).

- Deficiencia de Mg (factor **Mg<sub>1</sub>**): cuando la concentración de Mg en el CIC es menor de 0.4 cmol(+) kg<sup>-1</sup>.

En la Tabla IV.6 se recogen los porcentajes de suelos afectados por estos factores para cada material de partida y en la última fila el valor promedio del conjunto de todos los suelos estudiados. Destacan los suelos de brezal de rocas ultrabásicas porque son los únicos que presentan niveles de K y Ca descompensados respecto a la suma de bases. En este caso se trata de un desequilibrio frente al Mg de cambio (factores  $k_2$  y  $Ca_2$ ) y baja acidez, (5% de los suelos con factor h) propia de suelos hipermagnésicos.

Tabla IV.6. Modificadores intrínsecos de las propiedades químicas de los suelos de brezal en Galicia [Buol *et al.*, 1975; modificados Macías & Calvo, 1983]

	a	h	P	$k_1$	$k_2$	$Ca_1$	$Ca_2$	$Mg_1$	nº muestras
A	40%	60%	100%	80%	--	100%	--	20%	5
B	37%	11%	89%	17%	--	56%	--	44%	18
Es	--	75%	50%	75%	--	25%	--	38%	8
Gr	64%	36%	36%	55%	--	82%	--	--	11
P	--	100%	50%	--	--	33%	--	--	6
Q	17%	83%	33%	50%	--	100%	--	--	6
SQ	--	40%	20%	--	--	--	--	--	5
SO	--	100%	100%	100%	--	100%	--	--	2
UB	--	5%	42%	11%	37%	5%	68%	--	19
Todos	21%	36%	56%	34%	9%	46%	16%	15%	80

A: Anfibolitas de Touro, B: Rocas básicas, Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarcitas, SO: Sedimentos orgánicos, SQ: Sedimentos cuaternarios costeros y UB: Rocas ultrabásicas.

La deficiencia de fósforo (factor P) es la única que se presenta en todos los materiales y en elevados porcentajes, de manera que para el conjunto de todos los suelos de brezal de Galicia estudiados en la presente Memoria, el 56 % de las muestras tienen fuertes deficiencias de P asimilable. Los suelos de anfibolitas y sedimentos orgánicos presentan siempre valores inferiores a 5 mg kg<sup>-1</sup> y los suelos de rocas básicas en un 89% de los casos.

El siguiente factor en frecuencia de aparición en todos los suelos (46%) es el  $Ca_1$ , pues todos los suelos de anfibolitas, cuarcitas y sedimentos orgánicos son deficientes en Ca y los suelos de granitos en un 82% de los casos. La deficiencia de Ca suele ir asociada a la acidez del suelo, de manera que estos materiales presentan el 100% de los suelos con el factor a o h y el 57 % de todos los suelos de brezal presentan uno de los dos.

En cuanto a deficiencias de K se encuentran en un 34% de los suelos, destacando las elevadas proporciones de los suelos sobre anfibolitas (80%), esquistos (75%), granitos (55%) y cuarcitas (50%). Sólo el 15% de los suelos de brezal presentan deficiencias de Mg y éstas se concentran en los suelos sobre anfibolitas y rocas básicas.

## IV.3.6. ANÁLISIS TOTAL DE ELEMENTOS MAYORITARIOS

Las concentraciones de Ca, Mg, K, Si, Al y Fe totales para estos suelos pueden observarse en las Tablas IV.7 y IV.8. Se aprecia claramente la existencia de una gran heterogeneidad en los suelos en función del material de partida del que proceden. El valor medio del Ca total para todos los suelos de brezal es de  $1.51 \pm 1.61\%$ , con valores que oscilan entre un mínimo de  $0.04\%$  sobre cuarcitas y un máximo de  $5.96\%$  en anfíbolitas. Los suelos desarrollados sobre anfíbolitas ( $2.90 \pm 2.02\%$ ), rocas ultrabásicas ( $2.87 \pm 1.12\%$ ) y básicas ( $2.04 \pm 1.55\%$ ) presentan medias significativamente ( $p < 0.05$ ) mayores que los suelos sobre los demás materiales; estos últimos con valores inferiores al  $1\%$ .

Tabla IV.7. Análisis elemental de Ca, Mg, K, Si, Al y Fe de los suelos de brezal de Galicia (media y desviación estándar) de todo el conjunto y en cada uno de los materiales de partida

	Ca [%]	Mg [%]	K [%]	Si [%]	Al [%]	Fe [%]
<b>A</b>	$(2.90 \pm 2.02)^b$	$(0.91 \pm 0.37)^a$	$(0.78 \pm 0.12)^b$	$(15.45 \pm 2.56)^{cb}$	$(5.42 \pm 0.46)^{dc}$	$(10.50 \pm 0.53)^e$
<b>B</b>	$(2.04 \pm 1.55)^b$	$(0.91 \pm 0.77)^a$	$(0.64 \pm 0.14)^{ba}$	$(14.20 \pm 2.01)^b$	$(7.15 \pm 1.14)^{ed}$	$(8.26 \pm 1.05)^d$
<b>Es</b>	$(0.33 \pm 0.22)^a$	$(0.55 \pm 0.19)^a$	$(2.44 \pm 0.12)^d$	$(17.90 \pm 2.73)^{edc}$	$(7.41 \pm 0.77)^e$	$(2.71 \pm 0.52)^b$
<b>Gr</b>	$(0.36 \pm 0.52)^a$	$(0.34 \pm 0.25)^a$	$(2.00 \pm 0.81)^c$	$(21.63 \pm 2.73)^e$	$(5.74 \pm 1.49)^c$	$(2.17 \pm 0.51)^b$
<b>P</b>	$(0.50 \pm 0.27)^a$	$(0.13 \pm 0.04)^a$	$(1.67 \pm 0.37)^c$	$(18.63 \pm 2.97)^{ed}$	$(5.66 \pm 1.09)^{dc}$	$(4.22 \pm 0.67)^c$
<b>Q</b>	$(0.06 \pm 0.01)^a$	$(0.12 \pm 0.19)^a$	$(0.56 \pm 0.15)^b$	$(28.49 \pm 2.32)^f$	$(4.58 \pm 0.42)^{cb}$	$(1.00 \pm 0.40)^{ba}$
<b>SO</b>	$(0.09 \pm 0.03)^a$	$(0.04 \pm 0.01)^a$	$(0.14 \pm 0.03)^a$	$(3.97 \pm 1.25)^a$	$(0.99 \pm 0.04)^a$	$(0.63 \pm 0.19)^a$
<b>SQ</b>	$(0.32 \pm 0.17)^a$	$(0.08 \pm 0.07)^a$	$(1.43 \pm 0.35)^c$	$(28.67 \pm 3.13)^f$	$(2.88 \pm 0.40)^b$	$(0.70 \pm 0.18)^a$
<b>UB</b>	$(2.87 \pm 1.12)^b$	$(3.27 \pm 1.27)^b$	$(0.47 \pm 0.14)^{ba}$	$(16.06 \pm 7.13)^{dcb}$	$(4.16 \pm 0.79)^{cb}$	$(8.32 \pm 1.10)^d$
<b>Todos</b>	$(1.51 \pm 1.61)$	$(1.15 \pm 1.43)$	$(1.09 \pm 0.77)^{*I}$	$(18.44 \pm 5.00)^{*I}$	$(5.39 \pm 1.70)^{*I}$	$(5.50 \pm 3.45)$

Letras supraíndice distintas para cada elemento químico indican la pertenencia a grupos significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ) (A: Anfíbolitas de Touro, B: Rocas básicas (Gabros), Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarcitas, SO: Sedimentos orgánicos, SQ: Sedimentos cuaternarios costeros y UB: Rocas ultrabásicas). <sup>\*I</sup> Media de K, Si y Al para los suelos minerales (excluidos los suelos orgánicos)

El valor medio de Mg total para todos los suelos es de  $1.15 \pm 1.43\%$ , con valores que oscilan entre un mínimo de  $0.03\%$  sobre granitos y un máximo de  $5.96\%$  sobre rocas ultrabásicas. Los suelos sobre rocas ultrabásicas presentan medias ( $3.27 \pm 1.27\%$ ) significativamente mayores que los demás, que muestran medias inferiores al  $1\%$  en todos los casos.

El valor medio del K total para los suelos minerales es de  $1.09 \pm 0.77\%$ , con valores que oscilan entre un mínimo de  $0.13\%$  sobre granitos y un máximo de  $2.64\%$  en los suelos sobre esquistos. Las medias significativamente más elevadas las presentan los suelos sobre esquistos ( $2.44 \pm 0.12\%$ ), seguidos de granitos ( $2.00 \pm 0.81\%$ ), pizarras ( $1.67 \pm 0.37\%$ ) y sedimentos cuarcíticos ( $1.43 \pm 0.35\%$ ) que pertenecen a un mismo grupo. Los otros suelos presentan valores intermedios y las medias significativamente más bajas están en los suelos sobre sedimentos orgánicos ( $0.14 \pm 0.03\%$ ).

Tabla IV.8. Media, mediana, desviación estándar, rango y cuartiles para las concentraciones de Ca, Mg, K, Si, Al, Fe, Ti (%) y Mn, Cu y Zn (mg kg<sup>-1</sup>) de los suelos sobre los distintos materiales de partida

		Ca	Mg	K	Si	Al	Fe	Ti	Mn	Cu	Zn
<b>A</b> n=6	<b>Media</b>	<b>2.90</b>	<b>0.91</b>	<b>0.78</b>	<b>15.45</b>	<b>5.42</b>	<b>10.50</b>	<b>0.96</b>	<b>2846.2</b>	<b>972.4</b>	<b>196.8</b>
	Mediana	2.59	0.75	0.82	14.10	5.27	10.50	0.97	2932.1	904.0	208.8
	<b>D. estándar</b>	<b>2.02</b>	<b>0.37</b>	<b>0.12</b>	<b>2.56</b>	<b>0.46</b>	<b>0.53</b>	<b>0.06</b>	<b>748.2</b>	<b>353.3</b>	<b>19.6</b>
	Mínimo	0.32	0.56	0.57	13.00	5.01	9.90	0.86	2015.9	603.4	171.4
	Máximo	5.96	1.40	0.90	18.30	6.09	11.25	1.03	3867.4	1533.2	213.7
	Rango	5.64	0.84	0.32	5.30	1.08	1.35	0.17	1851.4	929.8	42.3
	Amplitud	3.07	0.71	0.17	4.88	0.86	0.97	0.10	1406.0	599.7	36.2
	1º Cuartil	2.57	0.63	0.80	13.70	5.05	10.12	0.96	2227.5	776.0	180.0
	3º Cuartil	3.07	1.20	0.83	18.15	5.68	10.71	0.99	3188.0	1045.5	210.0
<b>B</b> n=19	<b>Media</b>	<b>2.04</b>	<b>0.91</b>	<b>0.64</b>	<b>14.20</b>	<b>7.15</b>	<b>8.26</b>	<b>1.28</b>	<b>1833.3</b>	<b>56.4</b>	<b>114.8</b>
	Mediana	1.84	0.48	0.67	13.60	7.05	8.32	1.25	1915.9	49.6	112.4
	<b>D. estándar</b>	<b>1.55</b>	<b>0.77</b>	<b>0.14</b>	<b>2.01</b>	<b>1.14</b>	<b>1.05</b>	<b>0.23</b>	<b>539.2</b>	<b>25.6</b>	<b>28.3</b>
	Mínimo	0.27	0.04	0.39	11.50	4.25	6.31	0.89	738.9	40.9	64.6
	Máximo	5.34	2.09	0.85	17.52	9.20	9.73	1.75	2725.9	154.1	182.4
	Rango	5.07	2.06	0.46	6.02	4.95	3.42	0.86	1987.0	113.1	117.8
	Amplitud	2.91	1.48	0.21	3.66	1.54	1.74	0.31	687.7	10.3	27.0
	1º Cuartil	0.54	0.30	0.56	12.56	6.40	7.65	1.12	1566.6	45.7	102.9
	3º Cuartil	3.37	1.75	0.75	16.10	7.81	9.30	1.42	2209.3	55.8	124.6
<b>Es</b> n=8	<b>Media</b>	<b>0.33</b>	<b>0.55</b>	<b>2.44</b>	<b>17.90</b>	<b>7.41</b>	<b>2.71</b>	<b>0.40</b>	<b>1123.2</b>	<b>12.9</b>	<b>76.7</b>
	Mediana	0.23	0.59	2.46	18.63	7.74	2.56	0.42	1232.4	11.2	67.9
	<b>D. estándar</b>	<b>0.22</b>	<b>0.19</b>	<b>0.12</b>	<b>2.73</b>	<b>0.77</b>	<b>0.52</b>	<b>0.06</b>	<b>363.5</b>	<b>6.9</b>	<b>32.6</b>
	Mínimo	0.16	0.30	2.27	12.33	5.82	2.20	0.30	512.2	7.0	40.3
	Máximo	0.78	0.81	2.64	20.44	8.08	3.53	0.50	1533.0	22.0	134.1
	Rango	0.62	0.51	0.37	8.11	2.26	1.33	0.20	1020.8	15.0	93.8
	Amplitud	0.29	0.35	0.19	3.91	0.99	1.02	0.09	661.6	6.1	54.8
	1º Cuartil	0.19	0.37	2.35	16.55	7.01	2.27	0.36	834.2	8.2	52.1
	3º Cuartil	0.43	0.69	2.51	20.03	7.92	3.15	0.44	1403.7	14.3	99.5
<b>Gr</b> n=13	<b>Media</b>	<b>0.36</b>	<b>0.34</b>	<b>2.00</b>	<b>21.63</b>	<b>5.74</b>	<b>2.17</b>	<b>0.37</b>	<b>167.8</b>	<b>7.6</b>	<b>56.6</b>
	Mediana	0.16	0.30	2.34	22.52	6.05	2.17	0.38	143.3	5.5	57.8
	<b>D. estándar</b>	<b>0.52</b>	<b>0.25</b>	<b>0.81</b>	<b>2.97</b>	<b>1.49</b>	<b>0.51</b>	<b>0.11</b>	<b>108.9</b>	<b>9.1</b>	<b>15.8</b>
	Mínimo	0.12	0.05	0.37	14.10	3.33	1.27	0.19	34.6	1.0	26.3
	Máximo	1.90	0.82	3.05	23.99	7.66	2.99	0.62	375.2	33.4	77.9
	Rango	1.78	0.77	2.68	9.89	4.33	1.72	0.43	340.7	32.4	51.6
	Amplitud	0.17	0.44	1.17	4.00	2.66	0.78	0.11	156.8	7.6	24.8
	1º Cuartil	0.13	0.15	1.51	20.90	4.59	1.93	0.32	88.8	2.6	51.1
	3º Cuartil	0.30	0.52	2.54	23.51	6.87	2.50	0.40	216.2	7.6	67.0
<b>P</b> n=6	<b>Media</b>	<b>0.50</b>	<b>0.13</b>	<b>1.67</b>	<b>18.63</b>	<b>5.66</b>	<b>4.22</b>	<b>0.64</b>	<b>69.7</b>	<b>20.8</b>	<b>46.6</b>
	Mediana	0.62	0.12	1.46	18.59	5.99	4.36	0.59	73.5	20.6	44.8
	<b>D. estándar</b>	<b>0.27</b>	<b>0.04</b>	<b>0.37</b>	<b>2.32</b>	<b>1.09</b>	<b>0.67</b>	<b>0.14</b>	<b>27.3</b>	<b>11.0</b>	<b>13.0</b>
	Mínimo	0.13	0.09	1.39	15.70	3.48	2.91	0.53	38.1	3.3	31.1
	Máximo	0.74	0.19	2.20	21.30	6.35	4.79	0.91	96.9	16.2	66.8
	Rango	0.61	0.10	0.82	5.60	2.87	1.88	0.38	58.9	24.5	35.7
	Amplitud	0.53	0.06	0.72	4.68	1.04	0.76	0.14	54.0	8.3	21.5
	1º Cuartil	0.19	0.09	1.39	16.60	5.86	4.25	0.57	41.8	5.9	37.7
	3º Cuartil	0.69	0.15	2.08	20.97	6.28	4.63	0.63	94.2	18.8	54.5
<b>Q</b> n=7	<b>Media</b>	<b>0.06</b>	<b>0.12</b>	<b>0.56</b>	<b>28.49</b>	<b>4.58</b>	<b>1.00</b>	<b>0.34</b>	<b>39.6</b>	<b>5.1</b>	<b>12.7</b>
	Mediana	0.06	0.04	0.59	28.19	4.48	1.12	0.32	39.9	5.3	13.8
	<b>D. estándar</b>	<b>0.01</b>	<b>0.19</b>	<b>0.15</b>	<b>1.25</b>	<b>0.42</b>	<b>0.40</b>	<b>0.11</b>	<b>28.7</b>	<b>3.5</b>	<b>3.4</b>
	Mínimo	0.04	0.03	0.29	27.40	4.05	0.28	0.19	6.6	1.3	8.3
	Máximo	0.08	0.51	0.69	30.77	5.10	1.38	0.52	85.9	9.4	16.3
	Rango	0.04	0.48	0.40	3.37	1.05	1.10	0.33	79.3	8.1	8.1
	Amplitud	0.03	0.14	0.20	1.63	0.81	0.61	0.15	48.6	2.1	6.6
	1º Cuartil	0.00	0.03	0.54	27.67	4.33	0.81	0.29	13.6	2.7	9.0
	3º Cuartil	0.04	0.06	0.67	28.71	5.06	1.26	0.38	52.0	4.8	15.1
<b>SO</b> n=4	<b>Media</b>	<b>0.09</b>	<b>0.04</b>	<b>0.14</b>	<b>3.97</b>	<b>0.99</b>	<b>0.63</b>	<b>0.06</b>	<b>42.0</b>	<b>11.7</b>	<b>92.0</b>
	Mediana	0.10	0.04	0.15	4.01	0.97	0.66	0.06	42.0	11.7	92.0
	<b>D. estándar</b>	<b>0.03</b>	<b>0.00</b>	<b>0.03</b>	<b>0.05</b>	<b>0.04</b>	<b>0.19</b>	<b>0.01</b>	<b>20.7</b>	<b>0.4</b>	<b>48.0</b>
	Mínimo	0.06	0.04	0.13	3.85	0.95	0.45	0.05	26.9	11.5	60.0
	Máximo	0.11	0.04	0.17	4.04	1.05	0.76	0.07	57.0	12.0	123.9
	Rango	0.05	0.01	0.04	0.19	0.10	0.31	0.02	30.1	0.5	63.9
<b>SQ</b> n=5	<b>Media</b>	<b>0.32</b>	<b>0.08</b>	<b>1.43</b>	<b>28.67</b>	<b>2.88</b>	<b>0.70</b>	<b>0.10</b>	<b>197.0</b>	<b>2.2</b>	<b>19.2</b>
	Mediana	0.32	0.04	1.46	29.74	2.75	0.63	0.11	251.6	2.2	5.2
	<b>D. estándar</b>	<b>0.17</b>	<b>0.07</b>	<b>0.35</b>	<b>3.13</b>	<b>0.40</b>	<b>0.18</b>	<b>0.09</b>	<b>151.1</b>	<b>0.3</b>	<b>19.9</b>
	Mínimo	0.17	0.02	0.95	25.20	2.50	0.52	0.02	30.8	1.7	4.3
	Máximo	0.57	0.15	1.83	32.00	3.52	0.92	0.24	392.6	2.6	45.5
	Rango	0.40	0.13	0.87	6.80	1.02	0.40	0.22	361.8	1.9	41.3
	Amplitud	0.30	0.13	0.68	6.10	0.68	0.35	0.16	278.0	0.2	36.0
	1º Cuartil	0.17	0.02	1.20	25.50	2.65	0.57	0.03	57.8	2.1	5.1
	3º Cuartil	0.36	0.15	1.69	30.90	2.99	0.87	0.12	252.0	2.3	35.9
<b>UB</b> n=22	<b>Media</b>	<b>2.87</b>	<b>3.27</b>	<b>0.47</b>	<b>16.77</b>	<b>4.16</b>	<b>8.32</b>	<b>0.59</b>	<b>2011.0</b>	<b>22.8</b>	<b>100.1</b>
	Mediana	3.08	3.66	0.45	16.77	4.13	8.12	0.56	1925.7	21.1	95.0
	<b>D. estándar</b>	<b>1.12</b>	<b>1.27</b>	<b>0.14</b>	<b>1.38</b>	<b>0.79</b>	<b>1.10</b>	<b>0.26</b>	<b>440.6</b>	<b>8.6</b>	<b>27.6</b>
	Mínimo	1.40	1.42	0.23	14.66	2.64	6.74	0.25	1440.8	10.5	65.4
	Máximo	4.84	5.21	0.88	19.21	5.44	9.87	1.01	2821.7	38.3	160.6
	Rango	3.44	3.79	0.65	4.55	2.80	3.13	0.76	1380.9	27.9	95.1
	Amplitud	2.12	2.20	0.12	2.75	1.45	2.41	0.57	691.0	15.4	47.5
	1º Cuartil	1.90	2.21	0.42	15.45	3.51	7.19	0.36	1641.0	15.7	77.4
	3º Cuartil	3.91	4.29	0.53	17.84	4.92	9.53	0.81	2306.2	28.7	119.2

A: Anfibolitas de Touro, B: Rocas básicas, Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarcitas, SO: Sedimentos orgánicos, SQ: Sedimentos cuaternarios costeros y UB: Rocas ultrabásicas

Tabla IV.9. Media, mediana, desviación estándar, rango y cuartiles para las concentraciones de Ni, Cr, Pb, Br, Rb, Sr, Ga Y, Zr, Nb y Th (mg kg<sup>-1</sup>) en los suelos de brezal sobre los distintos materiales de partida

		Ni	Cr	Pb	As	Br	Rb	Sr	Ga	Y	Zr	Nb	Th
<b>A</b> n=6	<b>Media</b>	<b>60.1</b>	<b>511.2</b>	<b>9.5</b>	<b>4.5</b>	<b>56.9</b>	<b>23.3</b>	<b>43.9</b>	<b>19.4</b>	<b>38.2</b>	<b>112.1</b>	<b>4.9</b>	<b>2.5</b>
	Mediana	63.7	483.0	10.2	5.5	83.0	22.3	42.2	18.4	28.0	95.1	5.0	1.0
	<b>D. estándar</b>	<b>25.1</b>	<b>97.6</b>	<b>1.9</b>	<b>2.2</b>	<b>47.1</b>	<b>9.2</b>	<b>22.6</b>	<b>4.3</b>	<b>21.3</b>	<b>25.9</b>	<b>2.5</b>	<b>3.4</b>
	Mínimo	21.0	414.0	7.0	1.0	3.0	14.0	12.0	2.1	22.2	91.6	2.2	0.0
	Máximo	91.0	659.8	11.8	6.3	99.0	38.0	75.6	18.1	73.0	149.0	7.7	8.2
	Rango	70.0	245.8	4.8	5.3	96.0	24.0	63.6	23.0	50.8	57.4	5.5	8.2
	Amplitud intercuartil	36.8	175.4	3.6	3.6	89.3	15.8	35.0	4.9	35.4	46.1	4.9	5.3
	1° Cuartil	60.6	447.2	8.2	4.0	8.5	17.3	41.7	2.8	23.8	95.0	2.6	0.5
	3° Cuartil	64.2	552.1	10.5	6.0	91.1	25.0	48.0	18.2	43.9	129.9	7.0	2.8
<b>B</b> n=19	<b>Media</b>	<b>137.1</b>	<b>512.4</b>	<b>16.3</b>	<b>8.7</b>	<b>96.9</b>	<b>21.1</b>	<b>62.4</b>	<b>23.9</b>	<b>22.9</b>	<b>120.2</b>	<b>7.9</b>	<b>5.6</b>
	Mediana	137.2	519.6	16.5	7.8	83.0	19.6	80.0	19.2	23.3	127.9	8.0	5.9
	<b>D. estándar</b>	<b>50.7</b>	<b>171.8</b>	<b>5.0</b>	<b>4.8</b>	<b>59.5</b>	<b>5.7</b>	<b>38.0</b>	<b>4.4</b>	<b>5.3</b>	<b>40.7</b>	<b>2.8</b>	<b>3.6</b>
	Mínimo	57.3	222.4	5.7	1.0	24.4	13.0	8.8	15.6	10.4	62.8	3.0	0.0
	Máximo	237.3	851.9	25.4	17.7	268.4	35.3	122.3	32.9	32.1	197.5	14.1	13.4
	Rango	180.0	629.5	19.7	16.7	244.0	22.3	113.5	17.2	21.7	134.7	11.1	13.4
	Amplitud intercuartil	77.6	278.0	6.4	7.1	50.2	8.3	70.1	6.8	6.7	70.3	4.6	3.2
	1° Cuartil	47.2	389.8	14.5	5.4	63.7	17.5	21.2	21.5	20.0	80.1	5.7	4.4
	3° Cuartil	124.6	647.7	20.1	12.3	108.9	24.7	88.8	27.7	26.0	149.0	10.1	6.9
<b>Es</b> n=8	<b>Media</b>	<b>43.5</b>	<b>30.8</b>	<b>31.8</b>	<b>15.3</b>	<b>94.1</b>	<b>222.5</b>	<b>31.7</b>	<b>30.2</b>	<b>16.7</b>	<b>114.5</b>	<b>11.0</b>	<b>10.2</b>
	Mediana	30.2	20.8	31.6	13.2	90.9	220.5	28.7	29.8	16.2	111.5	10.3	10.1
	<b>D. estándar</b>	<b>33.1</b>	<b>34.5</b>	<b>3.7</b>	<b>5.6</b>	<b>14.9</b>	<b>25.4</b>	<b>8.4</b>	<b>2.9</b>	<b>2.9</b>	<b>30.0</b>	<b>1.8</b>	<b>1.5</b>
	Mínimo	10.6	1.0	24.8	8.8	77.9	181.0	23.8	26.6	12.9	89.0	8.7	8.4
	Máximo	106.4	98.5	37.3	24.5	123.0	271.2	45.5	33.8	21.5	145.2	13.3	13.1
	Rango	95.8	97.5	12.5	15.8	45.1	90.2	21.7	7.2	8.7	56.2	4.6	4.7
	Amplitud intercuartil	52.8	50.7	4.3	9.6	22.4	22.4	16.1	5.8	4.8	30.9	3.4	2.0
	1° Cuartil	20.4	1.0	30.5	11.5	83.1	211.8	25.1	27.7	14.6	101.5	9.6	9.1
	3° Cuartil	64.8	51.5	34.2	20.0	101.8	231.7	38.4	33.3	18.7	127.8	12.9	10.7
<b>Gr</b> n=13	<b>Media</b>	<b>19.4</b>	<b>17.2</b>	<b>40.5</b>	<b>12.1</b>	<b>99.6</b>	<b>174.3</b>	<b>79.9</b>	<b>22.2</b>	<b>15.2</b>	<b>145.8</b>	<b>8.8</b>	<b>13.1</b>
	Mediana	9.2	7.3	45.3	11.6	69.1	195.5	66.5	24.3	16.0	154.3	8.8	12.4
	<b>D. estándar</b>	<b>20.3</b>	<b>22.4</b>	<b>11.3</b>	<b>3.4</b>	<b>79.5</b>	<b>77.7</b>	<b>40.8</b>	<b>5.7</b>	<b>3.7</b>	<b>41.5</b>	<b>2.4</b>	<b>7.5</b>
	Mínimo	1.0	1.0	13.9	8.4	11.9	30.6	49.3	11.2	7.5	54.1	4.0	0.0
	Máximo	65.4	67.2	51.9	18.9	267.7	246.6	198.2	27.3	21.4	195.3	12.5	23.1
	Rango	64.4	66.2	38.1	10.5	255.8	215.9	149.0	16.1	13.9	141.2	8.6	23.1
	Amplitud intercuartil	24.0	28.4	13.6	5.5	84.9	119.7	18.8	8.3	5.1	62.3	3.4	12.1
	1° Cuartil	3.7	1.0	37.1	9.2	58.9	127.6	62.6	19.7	12.9	119.2	7.6	9.5
	3° Cuartil	5.8	22.3	48.0	14.3	113.8	235.2	77.4	26.3	17.2	176.7	10.3	18.5
<b>P</b> n=6	<b>Media</b>	<b>21.2</b>	<b>116.7</b>	<b>26.7</b>	<b>25.8</b>	<b>46.2</b>	<b>127.5</b>	<b>134.2</b>	<b>23.7</b>	<b>26.8</b>	<b>139.2</b>	<b>12.9</b>	<b>9.5</b>
	Mediana	22.3	124.9	22.4	22.9	30.3	128.8	153.2	25.1	26.1	123.9	12.5	9.9
	<b>D. estándar</b>	<b>3.7</b>	<b>19.3</b>	<b>12.4</b>	<b>14.4</b>	<b>36.9</b>	<b>21.9</b>	<b>45.4</b>	<b>5.0</b>	<b>2.7</b>	<b>31.2</b>	<b>1.7</b>	<b>2.8</b>
	Mínimo	15.7	82.9	18.7	9.5	23.5	88.9	46.3	13.9	24.4	109.8	11.2	4.4
	Máximo	24.5	131.0	51.3	52.9	119.7	155.3	170.6	27.5	31.9	190.7	15.4	12.2
	Rango	8.8	48.1	32.5	43.4	96.2	66.4	124.3	13.6	7.5	80.9	4.2	7.9
	Amplitud intercuartil	6.8	30.8	13.2	14.7	39.5	26.0	53.6	5.8	3.1	50.8	3.1	4.0
	1° Cuartil	6.9	105.8	19.5	20.9	26.5	125.4	126.0	23.6	25.2	123.0	11.6	9.0
	3° Cuartil	24.7	130.9	26.2	26.0	47.1	137.9	156.0	26.9	26.9	163.8	14.4	11.7
<b>O</b> n=7	<b>Media</b>	<b>5.1</b>	<b>43.5</b>	<b>14.6</b>	<b>58.6</b>	<b>22.5</b>	<b>20.4</b>	<b>23.2</b>	<b>3.4</b>	<b>13.1</b>	<b>282.7</b>	<b>6.9</b>	<b>9.0</b>
	Mediana	4.9	44.3	14.5	78.0	15.0	21.0	25.8	2.1	13.5	304.2	7.0	9.4
	<b>D. estándar</b>	<b>1.8</b>	<b>18.7</b>	<b>3.8</b>	<b>43.9</b>	<b>14.9</b>	<b>6.5</b>	<b>10.4</b>	<b>3.5</b>	<b>1.4</b>	<b>93.5</b>	<b>1.2</b>	<b>1.9</b>
	Mínimo	3.1	21.9	9.7	2.6	11.0	9.2	9.8	1.4	10.4	133.5	4.9	6.4
	Máximo	8.1	71.6	19.7	95.3	48.9	29.1	34.2	10.4	14.4	375.8	8.3	11.0
	Rango	5.0	49.7	10.1	92.8	37.9	19.9	24.4	9.0	4.0	242.3	3.4	4.6
	Amplitud intercuartil	2.8	34.2	6.6	91.5	23.2	7.9	21.7	3.2	1.7	170.9	1.9	3.9
	1° Cuartil	18.2	25.0	12.0	3.2	13.4	19.0	11.4	1.5	13.0	215.8	6.3	7.1
	3° Cuartil	24.2	54.0	17.4	94.2	31.7	22.9	32.2	2.7	14.0	362.9	7.7	10.7
<b>SO</b> n=4	<b>Media</b>	<b>10.1</b>	<b>27.6</b>	<b>31.2</b>	<b>17.1</b>	<b>162.2</b>	<b>19.2</b>	<b>10.3</b>	<b>2.5</b>	<b>2.4</b>	<b>17.4</b>	<b>1.4</b>	<b>0.0</b>
	Mediana	8.6	23.3	31.2	17.8	161.6	18.2	10.1	1.8	2.1	17.4	1.2	0.0
	<b>D. estándar</b>	<b>3.3</b>	<b>9.7</b>	<b>19.0</b>	<b>4.5</b>	<b>8.7</b>	<b>3.2</b>	<b>1.2</b>	<b>2.0</b>	<b>0.7</b>	<b>4.4</b>	<b>0.6</b>	<b>0.0</b>
	Mínimo	8.2	21.6	17.8	11.8	152.2	16.7	9.1	1.0	1.9	14.2	0.9	0.0
	Máximo	15.0	42.0	44.7	21.0	173.2	23.6	11.9	5.2	3.3	20.5	2.3	0.0
	Rango	6.8	20.4	26.9	9.2	21.0	6.9	2.8	4.2	1.4	6.3	1.4	0.0
<b>SO</b> n=5	<b>Media</b>	<b>5.5</b>	<b>17.7</b>	<b>11.7</b>	<b>3.4</b>	<b>34.2</b>	<b>129.3</b>	<b>65.8</b>	<b>8.0</b>	<b>21.6</b>	<b>57.1</b>	<b>6.1</b>	<b>9.9</b>
	Mediana	6.9	15.2	8.7	3.0	24.4	92.2	62.2	5.9	9.4	61.0	2.6	7.7
	<b>D. estándar</b>	<b>2.3</b>	<b>9.7</b>	<b>6.4</b>	<b>1.6</b>	<b>17.0</b>	<b>59.2</b>	<b>6.0</b>	<b>4.8</b>	<b>17.9</b>	<b>25.0</b>	<b>5.3</b>	<b>9.9</b>
	Mínimo	2.0	4.5	5.8	1.5	20.7	78.1	60.3	3.4	8.2	25.9	1.6	0.0
	Máximo	7.2	28.0	19.1	5.4	58.4	202.1	72.8	13.8	45.0	93.3	12.8	27.7
	Rango	5.2	23.4	13.3	4.0	37.7	124.0	12.5	10.4	36.8	67.4	11.2	27.7
	Amplitud intercuartil	4.1	18.0	12.4	2.9	31.0	110.0	11.3	9.1	32.6	47.3	9.9	16.4
	1° Cuartil	4.0	14.1	6.6	2.7	21.4	89.1	61.8	4.4	8.4	39.6	2.5	4.4
	3° Cuartil	7.1	26.7	18.1	4.5	45.8	185.2	71.9	12.3	36.7	66.6	11.0	9.7

<b>UB</b>	<b>Media</b>	<b>1442.6</b>	<b>5898.5</b>	<b>11.6</b>	<b>23.2</b>	<b>35.8</b>	<b>17.3</b>	<b>94.9</b>	<b>7.3</b>	<b>15.4</b>	<b>108.5</b>	<b>4.2</b>	<b>1.0</b>
n=22	Mediana	1386.7	4053.2	10.0	13.3	27.1	18.3	94.7	7.3	16.5	108.5	4.2	0.0
	<b>D. estándar</b>	<b>497.1</b>	<b>3393.4</b>	<b>8.1</b>	<b>3.4</b>	<b>27.5</b>	<b>4.2</b>	<b>27.1</b>	<b>3.0</b>	<b>5.6</b>	<b>45.2</b>	<b>1.1</b>	<b>1.4</b>
	Mínimo	661.3	2839.1	0.9	3.0	10.1	8.7	63.6	1.0	5.7	37.5	1.7	0.0
	Máximo	2722.0	12240.9	38.2	51.6	138.7	26.0	154.4	12.4	25.6	172.4	6.0	4.9
	Rango	2060.7	9401.9	37.4	48.8	128.6	17.3	90.8	11.4	20.0	135.0	4.3	4.9
	Amplitud intercuartil	561.2	6382.0	6.3	33.4	12.0	5.3	48.2	4.2	8.0	94.4	1.0	1.7
	1º Cuartil	1246.5	3634.3	8.5	8.0	23.9	14.9	72.3	5.4	11.2	69.0	3.9	1.6
	3º Cuartil	1665.4	7975.5	13.1	40.2	33.4	19.9	110.6	9.3	18.8	153.9	4.7	2.3

A: Anfibolitas de Touro, B: Rocas básicas, Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarcitas, SO: Sedimentos orgánicos, SQ: Sedimentos cuaternarios costeros y UB: Rocas ultrabásicas.

El valor medio del Si total para todos los suelos minerales de brezal es de  $18.44 \pm 5.00\%$ , con valores que oscilan entre un mínimo de 3.83% sobre sedimentos orgánicos y un máximo de 32.0% en los suelos sobre sedimentos cuaternarios. La media para el conjunto de los suelos minerales es de  $18.44 \pm 4.99\%$ . Las medias significativamente más elevadas las presentan los suelos sobre sedimentos cuaternarios ( $28.67 \pm 3.13\%$ ) y cuarcitas ( $28.49 \pm 2.32\%$ ) y los más bajos están sobre sedimentos orgánicos ( $3.97 \pm 1.25\%$ ). Los otros suelos presentan valores intermedios entre estos extremos.

El valor medio del Al total para todos los suelos de brezal minerales es de  $5.39 \pm 1.70\%$ , con valores que oscilan entre un mínimo de 0.95% en sedimentos orgánicos y un máximo de 5.96% sobre rocas básicas (gabros de Monte Castelo). El único material que se diferencia significativamente de todos los demás es el compuesto por los sedimentos orgánicos con medias ( $0.99 \pm 0.04\%$ ) significativamente menores. Las medias más elevadas se encuentran en los suelos sobre esquistos ( $7.41 \pm 0.77\%$ ) que no se diferencian significativamente de los suelos sobre rocas básicas ( $7.15 \pm 0.114\%$ ). Los demás grupos presentan valores intermedios.

El valor medio de Fe total para todos los suelos de brezal es de  $5.50 \pm 3.45\%$ , con valores que oscilan entre un mínimo de 0.28% sobre cuarcitas y un máximo de 9.90% en rocas básicas. Los suelos sobre anfibolitas ( $10.50 \pm 0.53\%$ ), rocas ultrabásicas ( $8.32 \pm 1.10\%$ ) y básicas ( $8.26 \pm 1.05\%$ ) presentan medias significativamente ( $p < 0.05$ ) mayores que los suelos sobre los demás materiales, en consonancia con su carácter máfico. De hecho, la concentración media de Fe en los gabros cuatriplifica la de los granitos (Wedepohl, 1990), relación que también se cumple en los contenidos para los suelos desarrollados a partir de estos materiales. Las concentraciones más bajas están los suelos desarrollados sobre sedimentos orgánicos ( $0.63 \pm 0.19\%$ ) y cuaternarios ( $0.70 \pm 0.18\%$ ).

Las concentraciones totales de estos elementos están en consonancia con la mineralogía de los distintos materiales de partida sobre los que se desarrollan estos suelos de brezal y con las referencias de la bibliografía (Born *et al.*, 1982; Calvo & Buurman, 1987; Puga, 1982; Taboada & García Paz, 1997).

## IV.3.7. ANÁLISIS TOTAL DE ELEMENTOS TRAZA

Las concentraciones totales de Ti, Mn, Cu, Zn, Ni, Cr, Pb, As, Br, Rb, Sr, Ga, Zr, Nb y Th en los suelos de brezal de Galicia pueden observarse en las Tablas IV.8 y IV.9.

El valor medio de Ti para todos los suelos es de  $0.65 \pm 0.42\%$ , con valores que oscilan entre un mínimo de 0.02% sobre sedimentos cuaternarios y un máximo de 1.75% en rocas básicas. Este máximo corresponde a los suelos del Complejo básico de los gabros Monte Castelo que se caracteriza por sus mineralizaciones de rutilo e ilmenita, lo que justifica esta anomalía en Ti; estos suelos de rocas básicas presentan medias ( $1.28 \pm 0.23\%$ ) significativamente mayores que los suelos sobre anfibolitas ( $0.96 \pm 0.06\%$ ), que ocupan la segunda posición, con medias significativamente mayores que todos los demás. El grupo con las medias más bajas está formado por los suelos sobre sedimentos cuaternarios ( $0.10 \pm 0.09\%$ ) y sedimentos orgánicos ( $0.06 \pm 0.01\%$ ). (Figura IV.7). Estos resultados son acordes con los rangos descritos por Born *et al.* (1982) y Taboada & García Paz (1997), pero las concentraciones de Ti los suelos de brezal situados en el Complejo básico de Monte Castelo son mayores que las referencias de Puga (1982).

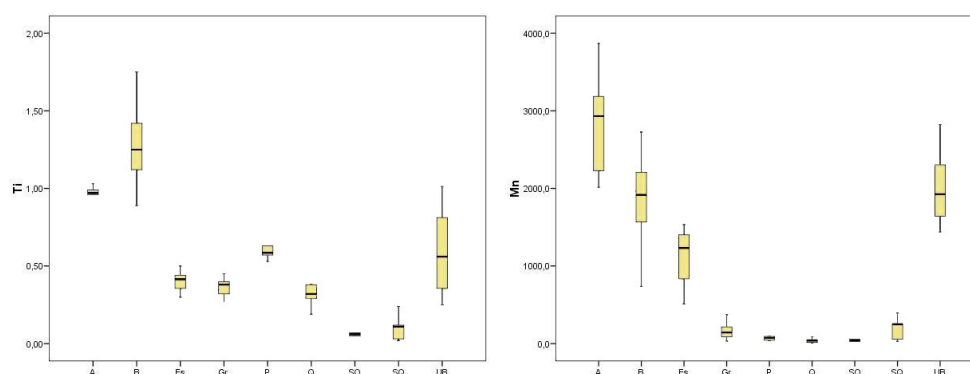


Figura IV.7 Diagrama de Cajas para las concentraciones de Ti (%) y Mn totales ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los suelos de brezal (mediana, rango intercuartílico, máximo y mínimo) sobre distintos materiales de partida (A: Anfibolitas de Touro, B: Rocas básicas, Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarcitas, SO: Sedimentos orgánicos, SQ: Sedimentos cuaternarios costeros y UB: Rocas ultrabásicas).

En la Tabla IV.10 aparecen las medias de Mn, Cu, Zn Ni, Cr y Pb para todos los suelos de brezal y por materiales de partida en comparación con los niveles de referencia de metales pesados en suelos de Galicia (Macías & Calvo, 2009)



El valor medio del Mn total para los suelos de brezal es de  $1197 \pm 1013 \text{ mg kg}^{-1}$ . Se aprecia la existencia de marcadas diferencias entre suelos ácidos y básicos, ya que este metal se concentra preferentemente en éstos últimos (Tabla IV.10 y Figura IV.7). Si consideramos cada grupo por separado los suelos sobre rocas básicas y ultrabásicas tienen una media de  $2100 \pm 751 \text{ mg kg}^{-1}$  y los de rocas ácidas de  $253 \pm 197 \text{ mg kg}^{-1}$ . Para el conjunto de las muestras el rango varía entre un mínimo de  $6.6 \text{ mg kg}^{-1}$  sobre cuarcitas y un máximo de  $3867 \text{ mg kg}^{-1}$  en los suelos de la mina de Touro, que poseen la media significativamente más elevada de todos los grupos. El segundo lugar lo ocupan los suelos de rocas ultrabásicas ( $2011 \pm 441 \text{ mg kg}^{-1}$ ) que se diferencian significativamente de los esquistos ( $1123 \pm 363 \text{ mg kg}^{-1}$ ); estos tres presentan medias mayores que los demás. Los contenidos de Mn en los suelos de brezal por materiales de partida en general, son similares a los del conjunto de suelos de Galicia (Macías & Calvo, 2009), salvo para esquistos (en que casi se duplican) y sobre pizarras ( $69.7 \pm 27.3 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y cuarcitas ( $39.6 \pm 39.9 \text{ mg kg}^{-1}$ ) que son unas 5 veces inferiores en los suelos de brezal. La media de Mn para el conjunto de todos los suelos es de  $1197 \pm 1013 \text{ mg kg}^{-1}$ , concentración que duplica los valores de referencia de los suelos de Galicia (Tabla IV.10), aunque estos valores están dentro del rango común en suelos ( $100\text{-}4000 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Kabata-Pendias, 1992).

En cuanto a los niveles de Cu (Tabla IV.10) destacan los suelos sobre anfíbolitas de la mina de Touro (situados en una de las escombreras de la antigua explotación de Cu) que presentan valores significativamente más elevados que los demás, con una media de  $972 \pm 353 \text{ mg kg}^{-1}$ . Los otros suelos no presentan medias significativamente diferentes entre sí, siendo la concentración media de Cu para este conjunto de  $20.2 \pm 17.7 \text{ mg kg}^{-1}$ , con valores que oscilan entre un mínimo de 1.7 sobre sedimentos cuaternarios y un máximo de  $154 \text{ mg kg}^{-1}$  en suelos de rocas básicas. Estos resultados son acordes con los encontrados por Macías & Calvo (2009), excepto en el caso de los suelos sobre rocas ultrabásicas ( $22.8 \pm 8.6 \text{ mg kg}^{-1}$ ), ya que los suelos de brezal presentan concentraciones de Cu mucho más bajas.

Tabla IV.10. Análisis elemental de Ti, Mn, Cu, Zn, Ni, Cr y Pb de los suelos de brezal de Galicia (media y desviación estándar) de todo el conjunto y en cada uno de los materiales de partida

	Ti [%]	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	Ni (mg kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg kg <sup>-1</sup> )	Pb(mg kg <sup>-1</sup> )
<b>A</b>	(0.96±0.06) <sup>c</sup>	(2846±748) <sup>d</sup>	(972±353) <sup>b</sup>	(196.8±19.6) <sup>d</sup>	(60.1±25.1) <sup>a</sup>	(511±98) <sup>a</sup>	(9.5±1.9) <sup>a</sup>
<b>B</b>	(1.28±0.23) <sup>d</sup>	(1833±539) <sup>c</sup>	(56.4±25.6) <sup>a</sup>	(114.8±28.3) <sup>c</sup>	(137±50.7) <sup>a</sup>	(512±172) <sup>a</sup>	(16.3±5) <sup>ba</sup>
<i>B ref.</i>	-----	(1175±623)	(49.9±31.8)	(66.3±26.5)	(65.7±32.1)	(129±79)	(32.0±19.4)
<b>Es</b>	(0.40±0.06) <sup>b</sup>	(1123±363) <sup>b</sup>	(12.9±6.9) <sup>a</sup>	(76.7±32.6) <sup>cb</sup>	(46.5±33.1) <sup>a</sup>	(30.8±34.5) <sup>a</sup>	(31.8±3.7) <sup>dc</sup>
<i>Es ref.</i>	-----	(591±379)	(23.9±11.8)	(65.8±28.8)	(40.7±18.3)	(48.8±31.0)	(31.0±16.5)
<b>Gr</b>	(0.37±0.11) <sup>b</sup>	(168±109) <sup>a</sup>	(7.6±9.1) <sup>a</sup>	(56.6±15.8) <sup>b</sup>	(19.4±20.3) <sup>a</sup>	(17.2±22.4) <sup>a</sup>	(40.5±11.3) <sup>d</sup>
<i>Gr ref.</i>	-----	(164±123)	(9.8±7.9)	(50.9±24.2)	(23.7±13.1)	(20.2±14.0)	(29.8±15.7)
<b>P</b>	(0.64±0.14) <sup>b</sup>	(69.7±27.3) <sup>a</sup>	(20.8±11.0) <sup>a</sup>	(46.6±13.0) <sup>ba</sup>	(21.2±3.7) <sup>a</sup>	(116.7±19.3) <sup>a</sup>	(26.7±12) <sup>cb</sup>
<i>P ref.</i>	-----	(346±334)	(24.9±14.6)	(69.1±36.0)	(43.2±23.5)	(43.7±26.2)	(26.1±10.6)
<b>Q</b>	(0.34±0.11) <sup>b</sup>	(39.6±39.9) <sup>a</sup>	(5.1±3.5) <sup>a</sup>	(12.7±3.4) <sup>a</sup>	(5.1±1.8) <sup>a</sup>	(43.5±18.7) <sup>a</sup>	(14.6±3.8) <sup>ba</sup>
<i>Q ref.</i>	-----	(197±279)	(16.8±14.3)	(47.0±32.2)	(34.9±19.6)	(28.3±22.3)	(19.2±3.7)
<b>SO</b>	(0.06±0.01) <sup>a</sup>	(42.0±20.7) <sup>a</sup>	(11.7±0.4) <sup>a</sup>	(92.0±48.0) <sup>cb</sup>	(10.1±3.3) <sup>a</sup>	(27.6±9.7) <sup>a</sup>	(31.2±19) <sup>cb</sup>
<b>SQ</b>	(0.10±0.09) <sup>a</sup>	(197±151) <sup>a</sup>	(2.2±0.3) <sup>a</sup>	(19.2±19.9) <sup>a</sup>	(5.5±2.3) <sup>a</sup>	(17.7±9.7) <sup>a</sup>	(11.7±6.4) <sup>a</sup>
<b>UB</b>	(0.59±0.26) <sup>b</sup>	(2011±441) <sup>c</sup>	(22.8±8.6) <sup>a</sup>	(100.1±27.6) <sup>c</sup>	(1442±497) <sup>b</sup>	(5899±3393) <sup>b</sup>	(11.6±8.1) <sup>a</sup>
<i>UB ref.</i>	-----	(1508±587)	(205±227)	(81.7±34.8)	(2156±690)	(4268±4850)	(18.3±6.1)
<b>To-</b>	(0.65±0.42)	(1197±1013)	(20.2±17.2) <sup>*1</sup>	(85.5±50.1)	(60.8±57.4) <sup>*2</sup>	(225±192) <sup>*2</sup>	(20.3±13.0)
<i>ref.</i>	-----	(524±640)	(26.9±56.9)	(61.3±36.6)	(109±406)	(269±1460)	(28.5±15.5)

Letras supraíndice diferentes para cada elemento químico indican la pertenencia a grupos significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ) (A: Anfíbolitas de Touro, B: Rocas básicas, Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarzitas, SO: Sedimentos orgánicos, SQ: S. cuaternarios costeros y UB: Rocas ultrabásicas). \*Media de Cu para el conjunto de los suelos, excepto sobre anfíbolitas de Touro y <sup>2</sup>excepto rocas ultrabásicas para Ni y Cr **ref.**= niveles de referencia genéricos en suelos de Galicia (Macías & Calvo, 2009.)

El valor medio de Zn para todos los suelos de brezal es de  $85.5 \pm 50.1$  mg kg<sup>-1</sup>, con concentraciones que oscilan entre un mínimo de  $3.4$  mg kg<sup>-1</sup> sobre cuarzitas y un máximo de  $214$  mg kg<sup>-1</sup> sobre las anfíbolitas de Touro. Este último valor es acorde con el hecho de que la calcopirita (CuS) y la galena (ZnS) van asociadas en mineralizaciones de Galicia (García Paz, com. pers.). El Zn se concentra también en rocas básicas, de manera que el segundo grupo de suelos con las mayores concentraciones de éste elementos son los de rocas básicas ( $114.8 \pm 28.3$  mg kg<sup>-1</sup>) y ultrabásicas ( $100.1 \pm 27.6$  mg kg<sup>-1</sup>). Destacan también por sus concentraciones en este elemento los suelos desarrollados sobre sedimentos orgánicos ( $92.0 \pm 48.0$  mg kg<sup>-1</sup>), en los que el Zn actúa como un trazador de las emisiones de la Central Térmica de As Pontes (Martínez Cortizas, 1997). Los únicos suelos que presentan medias significativamente menores son los de las cuarzitas ( $12.7 \pm 3.4$  mg kg<sup>-1</sup>) y los sedimentos cuaternarios costeros ( $19.2 \pm 19.9$  mg kg<sup>-1</sup>). Los resultados de Zn están en consonancia con los descritos por Macías & Calvo (2009) y dentro del rango común en suelos, entre 10 y 300 mg kg<sup>-1</sup> (Beckett & Davis, 1977).

Las concentraciones más elevadas de Ni y Cr se encuentran en los suelos de rocas ultrabásicas. Las concentraciones medias de Ni y Cr estos suelos son de  $1442 \pm 497$  y  $5899 \pm 3393$   $\text{mg kg}^{-1}$ , respectivamente; similares a las de Macías & Calvo (2009). El conjunto de los demás suelos presentan concentraciones significativamente inferiores con una media de  $60.8 \pm 67.4$   $\text{mg kg}^{-1}$  y rango (1.0-50.7  $\text{mg kg}^{-1}$ ) para el Ni y media de  $225 \pm 192$   $\text{mg kg}^{-1}$  y rango (1-660  $\text{mg kg}^{-1}$ ) para el Cr. La variabilidad existente para las concentraciones de estos metales en el conjunto de los suelos puede observarse en la Figura IV.8, donde destacan los suelos con mayor concentración media por su gran variabilidad: rocas básicas ( $137 \pm 51$   $\text{mg kg}^{-1}$ ) y esquistos ( $46.5 \pm 33.1$   $\text{mg kg}^{-1}$ ) para Ni y suelos de rocas básicas ( $512 \pm 172$   $\text{mg kg}^{-1}$ ) y anfíbolitas ( $511 \pm 98$   $\text{mg kg}^{-1}$ ) para Cr. En la Figura IV.8 se representan los contenidos de Ni y Cr en estos suelos sin considerar los suelos sobre rocas ultrabásicas que tienen concentraciones al menos un orden de magnitud mayores que los suelos desarrollados sobre las otras litologías.

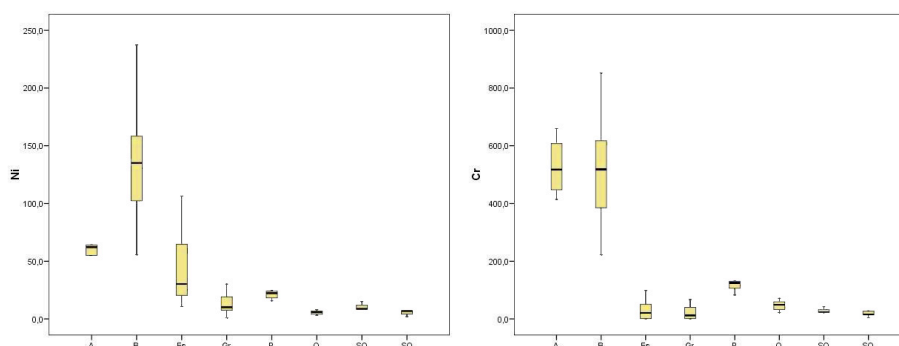


Figura IV.8. Diagrama de Cajas para las concentraciones ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) de Ni y Cr totales en los suelos de brezal (mediana, rango intercuartílico, máximo y mínimo) sobre distintos materiales de partida (A: Anfíbolitas de Touro, B: Rocas básicas, Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarzitas, SO: Sedimentos orgánicos, SQ: Sedimentos cuaternarios costeros) No se representan los suelos sobre rocas ultrabásicas.

En cuanto a los contenidos de Pb (Tabla IV.10), el valor medio para todos los suelos de brezal es de  $28.5 \pm 15.5$   $\text{mg kg}^{-1}$ , con concentraciones que oscilan entre un mínimo de 0.9  $\text{mg kg}^{-1}$  sobre rocas ultrabásicas y un máximo de 51.9  $\text{mg kg}^{-1}$  sobre granitos. Esto es acorde con el origen de estos materiales y su evolución ya que la corteza continental tiene concentraciones de Pb unas 15 veces superiores a las de la corteza oceánica (Wedepohl, 1990). Se trata de un elemento poco móvil y que es retenido en el suelo (Evans, 1989) al ser inmovilizado en la materia orgánica, los óxidos metálicos y arcilla del suelo (Encabo Checa, 1997). El Pb se asocia preferentemente a los feldespatos por lo que los suelos derivados de granitos presentan la media más elevada ( $40.5 \pm 11.3$   $\text{mg kg}^{-1}$ ), seguidos de los sedimentos orgánicos ( $31.2 \pm 19.0$   $\text{mg kg}^{-1}$ ) y las pizarras ( $26.7 \pm 12$   $\text{mg kg}^{-1}$ ) (Figura IV.9). Los altos niveles en Histosoles se explican por el hecho de que es uno de los elementos metálicos con mayor afinidad por la materia orgánica y que forma compuestos de baja solubilidad por complejación con ligandos orgánicos (ácidos húmicos y fúlvicos) (Bodek *et al.*, 1988). Las concentraciones más bajas están en los suelos desarrollados a partir de rocas ultrabásicas ( $11.6 \pm 8.1$   $\text{mg kg}^{-1}$ ), sedimentos cuaternarios ( $11.7 \pm 6.4$   $\text{mg kg}^{-1}$ ) y anfíbolitas ( $9.5 \pm 1.9$   $\text{mg kg}^{-1}$ ). Los resultados de Pb están en consonancia con los descritos por Macías & Calvo (2009) para el conjunto de todos los suelos de Galicia.

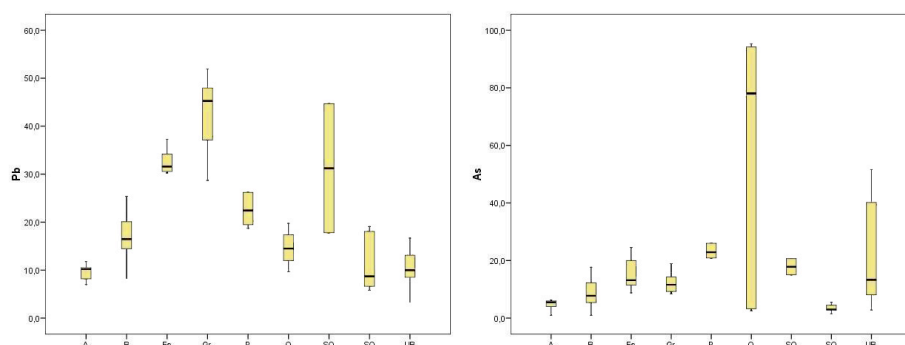


Figura IV.9. Diagrama de Cajas para las concentraciones ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) de Pb y As (mediana y rango intercuartílico) sobre distintos materiales de partida (A: Anfibolitas de Touro, B: Rocas básicas, Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarcitas, SO: Sedimentos orgánicos, SQ: S. cuaternarios costeros).

El valor medio de As para todos los suelos es de  $17.2 \pm 19.1 \text{ mg kg}^{-1}$ , con concentraciones que oscilan entre un mínimo de  $1.0 \text{ mg kg}^{-1}$  sobre rocas básicas y anfibolitas, y un máximo de  $95.3 \text{ mg kg}^{-1}$  sobre cuarcitas (Q2). Este valor tan elevado sobre cuarcitas constituye una anomalía y no se puede explicar atendiendo al material de partida del suelo (Figura IV.9). En consecuencia los suelos sobre cuarcitas presentan medias significativamente más elevadas ( $58.6 \pm 43.9 \text{ mg kg}^{-1}$ ). El segundo lugar lo ocupan los suelos sobre pizarras ( $25.8 \pm 14.4 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y rocas ultrabásicas ( $23.2 \pm 3.4 \text{ mg kg}^{-1}$ ), seguidos de los sedimentos orgánicos ( $17.1 \pm 4.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ), esquistos ( $15.3 \pm 5.6 \text{ mg kg}^{-1}$ ), granitos ( $12.1 \pm 3.4 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y rocas básicas ( $8.7 \pm 4.8 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Los valores de As más bajos están en los suelos sobre sedimentos cuaternarios ( $3.4 \pm 1.6 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y anfibolitas ( $4.5 \pm 2.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Estos resultados son acordes con los descritos por Macías & Calvo (2009), que dan una media en suelos de Galicia de  $20.60 \pm 26.1 \text{ mg kg}^{-1}$ . La media para los demás suelos de brezal de Galicia (sin Q2) es de  $14.96 \pm 9.21$ .

En la Tabla IV.11 aparecen las medias de Br, Rb, Zr, Ga, Zr, Nb y Th para todo el conjunto de los suelos de brezal y por materiales de partida. El valor medio del Br para los suelos es de  $73.0 \pm 59.4 \text{ mg kg}^{-1}$  y su rango varía entre un mínimo de  $10.1 \text{ mg kg}^{-1}$  sobre rocas ultrabásicas y un máximo de  $268 \text{ mg kg}^{-1}$  en los suelos de rocas básicas (Tabla IV.11). El grupo con las medias significativamente más altas es el de los sedimentos orgánicos ( $162 \pm 8.7 \text{ mg kg}^{-1}$ ), resultado acorde con la afinidad de este halogenuro por los compuestos orgánicos en los que aparece concentrado: los valores resultantes son superiores a los valores de referencia, pero están dentro del rango de los encontrados por otros autores en suelos de Galicia (Peiteado *et al.*, 2002).

El valor medio de Rb para todos los suelos de brezal es de  $71.6 \pm 80.3 \text{ mg kg}^{-1}$ , con concentraciones que oscilan entre un mínimo de  $8.7 \text{ mg kg}^{-1}$  sobre rocas ultrabásicas y un máximo de  $271 \text{ mg kg}^{-1}$  sobre esquistos. El Rb se concentra preferentemente en rocas ácidas. Así, los valores medios más elevados, siempre superiores a  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  están sobre esquistos, granitos, pizarras y sedimentos cuaternarios. El grupo de los suelos sobre esquistos es el que presenta las medias significativamente más elevadas alcanzando los  $222 \pm 25 \text{ mg kg}^{-1}$  (Tabla IV.11 y Figura IV.10)

Tabla IV.11. Análisis elemental de Br, Rb, Sr, Ga, Zr, Nb y Th de los suelos de brezal de Galicia (media y desviación estándar) de todo el conjunto y en cada uno de los materiales de partida

	Br (mg kg <sup>-1</sup> )	Rb (mg kg <sup>-1</sup> )	Sr (mg kg <sup>-1</sup> )	Ga (mg kg <sup>-1</sup> )	Zr (mg kg <sup>-1</sup> )	Nb (mg kg <sup>-1</sup> )	Th(mg kg <sup>-1</sup> )
<b>A</b>	(56.9±47.1) <sup>a</sup>	(23.3±9.2) <sup>a</sup>	(43.9±22.6) <sup>ba</sup>	(19.4±4.3) <sup>b</sup>	(112±26) <sup>cb</sup>	(4.9±2.5) <sup>cb</sup>	(2.5±3.4) <sup>ba</sup>
<b>B</b>	(96.9±59.5) <sup>ba</sup>	(21.1±5.7) <sup>a</sup>	(62.4±38.0) <sup>cb</sup>	(23.9±4.4) <sup>b</sup>	(120±30) <sup>cb</sup>	(7.9±2.8) <sup>cb</sup>	(5.6±3.6) <sup>ba</sup>
<b>Es</b>	(94.1±14.9) <sup>ba</sup>	(222±25) <sup>c</sup>	(31.7±8.4) <sup>ba</sup>	(30.2±2.9) <sup>c</sup>	(114±30) <sup>cb</sup>	(11.0±1.8) <sup>ed</sup>	(10.2±1.5) <sup>d</sup>
<b>Gr</b>	(96.6±79.5) <sup>ba</sup>	(174±78) <sup>b</sup>	(79.9±40.8) <sup>dc</sup>	(22.2±5.7) <sup>b</sup>	(146±42) <sup>c</sup>	(8.8±2.4) <sup>dc</sup>	(13.1±7.5) <sup>d</sup>
<b>P</b>	(46.2±36.9) <sup>a</sup>	(127±22) <sup>b</sup>	(134±45) <sup>d</sup>	(23.7±5.0) <sup>b</sup>	(139±31) <sup>c</sup>	(12.9±1.7) <sup>e</sup>	(9.5±2.8) <sup>dc</sup>
<b>Q</b>	(22.5±14.9) <sup>a</sup>	(20.4±6.5) <sup>a</sup>	(23.2±10.4) <sup>ba</sup>	(3.4±3.5) <sup>a</sup>	(283±94) <sup>d</sup>	(6.9±1.2) <sup>cb</sup>	(9.0±1.9) <sup>ba</sup>
<b>SO</b>	(162±8.7) <sup>b</sup>	(19.2±3.2) <sup>a</sup>	(10.3±1.2) <sup>a</sup>	(2.5±2.0) <sup>a</sup>	(57.3±26.0) <sup>a</sup>	(1.4±0.6) <sup>a</sup>	(0) <sup>a</sup>
<b>SQ</b>	(34.2±17.0) <sup>a</sup>	(129±59) <sup>b</sup>	(65.8±6.0) <sup>b</sup>	(8.0±4.8) <sup>a</sup>	(17.4±4.4) <sup>ba</sup>	(6.1±5.3) <sup>cb</sup>	(9.9±9.9) <sup>d</sup>
<b>UB</b>	(35.8±27.5) <sup>a</sup>	(17.3±4.2) <sup>a</sup>	(94.9±27.1) <sup>dc</sup>	(7.3±3.0) <sup>a</sup>	(108±45) <sup>cb</sup>	(4.2±1.1) <sup>ba</sup>	(1.0±1.4) <sup>a</sup>
<b>To-</b>	(73.0±59.4)	(71.6±80.3)	(70.3±45.4)	(16.3±9.8)	(126.2±67.5)	(7.0±3.6)	(6.1±5.9)
<i>ref.</i>	(5-40) <sup>*1,2</sup>	(100-200) <sup>*1,2</sup>	(60-300) <sup>*3</sup>	(0-30) <sup>*3</sup>	(100-400) <sup>*2</sup>	----	----

Letras supraíndice diferentes para cada elemento químico indican la pertenencia a grupos significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ) (A: Anfibolitas de Touro, B: Rocas básicas, Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarzitas, SO: Sedimentos orgánicos, SQ: Sedimentos cuaternarios costeros y UB: Rocas ultrabásicas). Valores de referencias: <sup>\*1</sup>= Aller *et al.* (1989), <sup>\*2</sup>= Kabata-Pendias *et al.* (1992), <sup>\*3</sup>= Aubertr *et al.* (1977).

El valor medio de Sr para todos los suelos de brezal es de  $134 \pm 45 \text{ mg kg}^{-1}$ , con concentraciones que oscilan entre un mínimo de  $8.8 \text{ mg kg}^{-1}$  sobre rocas básicas y un máximo de  $198 \text{ mg kg}^{-1}$  en suelos derivados de granitos. Las medias más elevadas se encuentran en suelos sobre pizarras ( $134 \pm 45 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y los valores más bajos, en suelos orgánicos ( $10.3 \pm 1.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Las medias de los suelos sobre pizarras no se diferencian significativamente de granitos ( $79.9 \pm 40.8 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y rocas ultrabásicas ( $94.9 \pm 27.1 \text{ mg kg}^{-1}$ ), pero sí de los demás suelos que presentan concentraciones medias inferiores. El rango común de concentración de este elemento en suelos es  $60\text{-}300 \text{ mg kg}^{-1}$  (Aubertr *et al.*, 1977). En los suelos de brezal hay valores inferiores a  $60 \text{ mg kg}^{-1}$  sobre sedimentos orgánicos, cuarcitas y esquistos (Tabla IV.11 y Figura IV.10).

En cuanto a los niveles de Ga, la media para todos los suelos de brezal es de  $16.3 \pm 9.8 \text{ mg kg}^{-1}$ , con concentraciones que oscilan entre un mínimo de  $1.0 \text{ mg kg}^{-1}$  sobre rocas ultrabásicas y sedimentos orgánicos y un máximo de  $33.8 \text{ mg kg}^{-1}$  sobre esquistos, que son los suelos que presentan medias ( $1.67 \pm 0.37 \text{ mg kg}^{-1}$ ) significativamente más elevadas. Valores intermedios los presentan los suelos sobre anfibolitas ( $19.4 \pm 4.3 \text{ mg kg}^{-1}$ ), rocas básicas ( $23.9 \pm 4.4 \text{ mg kg}^{-1}$ ), granitos ( $22.2 \pm 5.7 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y pizarras ( $23.7 \pm 5.0 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Las menores concentraciones, con medias inferiores a  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  están en los suelos derivados de sedimentos cuaternarios ( $8.0 \pm 4.8 \text{ mg kg}^{-1}$ ), rocas ultrabásicas ( $7.3 \pm 3.0 \text{ mg kg}^{-1}$ ), cuarcitas ( $3.4 \pm 3.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y sedimentos orgánicos ( $2.5 \pm 2.0 \text{ mg kg}^{-1}$ ), con el valor medio más bajo para todos los suelos (Tabla IV.11 y Figura IV.10).

El valor medio de Y para todos los suelos de brezal es de  $18.7 \pm 10.0 \text{ mg kg}^{-1}$ , con concentraciones que oscilan entre un mínimo de  $1.9 \text{ mg kg}^{-1}$  en suelos orgánicos y un máximo de  $73 \text{ mg kg}^{-1}$  en suelos sobre anfibolitas, que son los suelos con las medias significativamente más elevadas ( $38.2 \pm 21.3 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Los demás suelos presentan concentraciones intermedias, excepto los suelos orgánicos que presentan las concentraciones significativamente más bajas ( $2.4 \pm 0.7 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Tabla IV.11 y Figura IV.10). Los suelos de brezal presentan medias dentro del rango  $10\text{-}150 \text{ mg kg}^{-1}$  (Kabata-Pendias *et al.*, 1992).

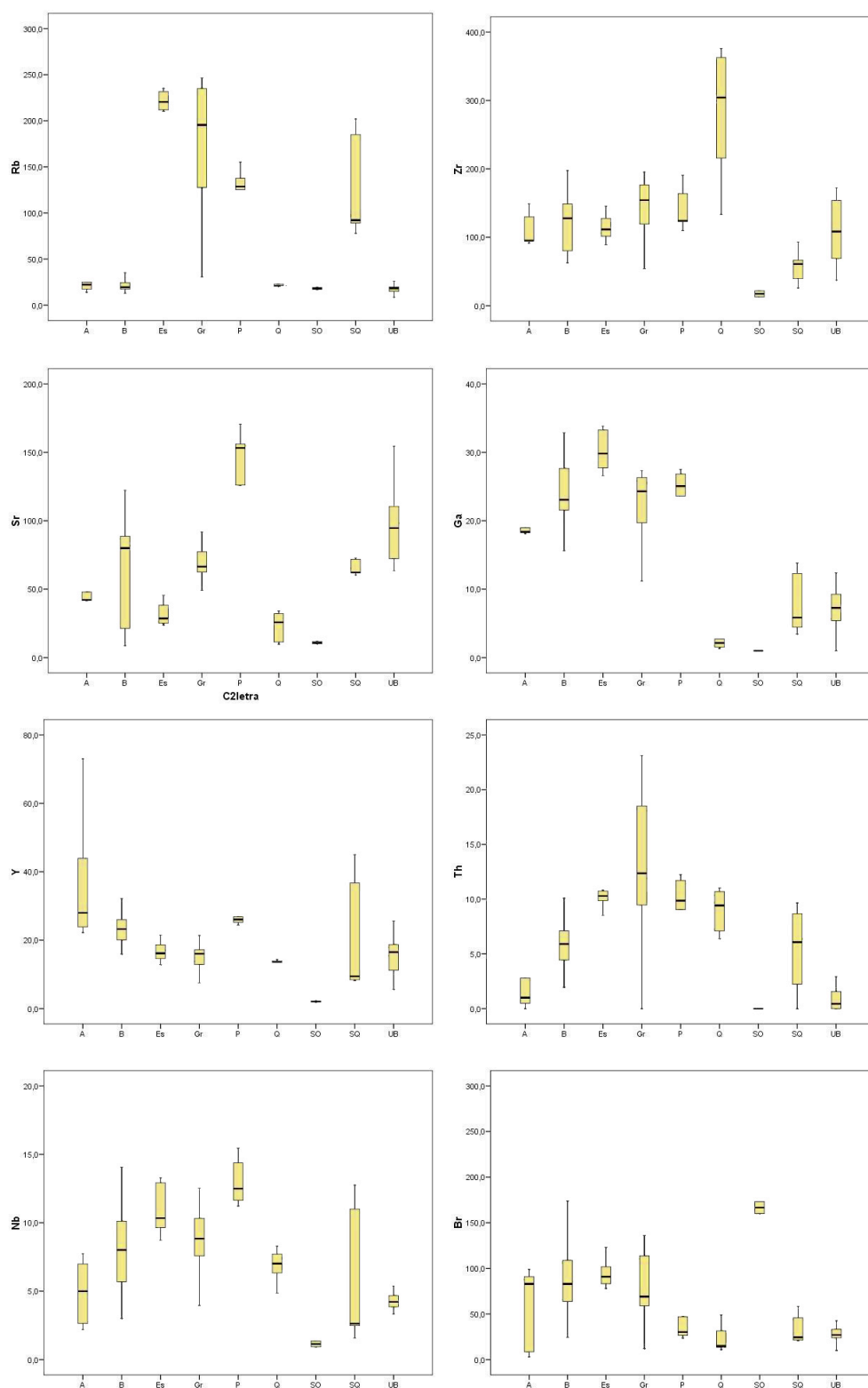


Figura IV.10. Diagrama de Cajas para las concentraciones de Rb, Sr, Zr, Ga, Y, Th, Nb y Br en mg kg<sup>-1</sup> (mediana, rango intercuartílico, máximo y mínimo) en los suelos de brezal sobre distintos materiales de partida (A: Anfibolitas de Touro, B: Rocas básicas, Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarcitas, SO: Sedimentos orgánicos, SQ: Sedimentos cuaternarios costeros y UB: Rocas ultrabásicas).

La concentración media de Zr es  $126 \pm 67 \text{ mg kg}^{-1}$ , con valores que oscilan entre un mínimo de  $14.2 \text{ mg kg}^{-1}$  en suelos de sedimentos cuaternarios y un máximo de  $376 \text{ mg kg}^{-1}$  sobre cuarcitas, que presentan la media ( $283 \pm 94 \text{ mg kg}^{-1}$ ) significativamente más elevada. En efecto sobresalen las elevadas concentraciones de este elemento en el suelo Q2 sobre cuarcitas, asociadas a las anomalías de As de estos suelos. Así, la media para los demás suelos de brezal de Galicia (sin Q2) resulta ser de  $14.96 \pm 9.21$ . De todas maneras las concentraciones de Zr de los suelos de brezal están dentro del rango común para este elemento ( $100\text{-}400 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Aller *et al.*, 1989), excepto los suelos desarrollados sobre sedimentos cuaternarios que tienen valores inferiores (Tabla IV.11 y Figura IV.10).

El valor medio de Nb de los suelos es de  $7.0 \pm 3.6 \text{ mg kg}^{-1}$ , con concentraciones que oscilan entre un mínimo de  $0.9 \text{ mg kg}^{-1}$  en suelos orgánicos y un máximo de  $15.4 \text{ mg kg}^{-1}$  en suelos sobre pizarras, que son los suelos con las medias significativamente más elevadas ( $12.9 \pm 1.7 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Tabla IV.11 y Figura IV.10).

Para el Th la media para todos los suelos de brezal es de  $6.1 \pm 5.9 \text{ mg kg}^{-1}$ , con concentraciones mínimas en casi todos suelos que están por debajo del límite de detección instrumental. Las concentraciones medias más elevadas están en los suelos desarrollados sobre granitos ( $13.1 \pm 7.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Tabla IV.11 y Figura IV.10).

#### IV.3.8. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Las propiedades químicas analizadas se han sometido a un análisis factorial por componentes principales para averiguar cuáles son factores que pueden explicar la variabilidad de los suelos de brezal estudiados. Nueve componentes principales mostraron autovalores mayores que 1, y en conjunto explican el 87% de la varianza total (Tabla IV.12). Los 4 primeros componentes explican, individualmente, entre un 25% y un 11% de la varianza y, en conjunto, suponen un 66% de la varianza total. A cada uno de los restantes componentes se asocian proporciones mucho menores, aunque en conjunto explican un 21% de la varianza total.

Tabla IV.12. Varianza explicada por los componentes principales significativos

Componente principal	% varianza que explica	% varianza acumulada
CP1	25,2	25,2
CP2	16,6	41,8
CP3	13,2	55,0
CP4	11,3	66,3
CP5	5,2	71,5
CP6	4,6	76,1
CP7	3,7	79,8
CP8	3,6	83,4
CP9	3,3	86,7

Los factores de carga (*factor loadings*) de cada variable (en este caso, propiedad química del suelo) pueden observarse en la Tabla IV.13. Estos factores de carga reflejan el grado de correlación entre la propiedad química y el componente principal considerado. El primer componente principal explica un 25% de la varianza total y a él se asocian con cargas positivas el pH en agua (0.82) y KCl (0.86), la suma de bases (0.95), el  $\text{Ca}_e$  (0.89), el  $\text{Mg}_e$  (0.90), la CICE (0.79), el Mg total (0.73), el Ni total (0.71) y el Cr total (0.60); y con cargas negativas, el  $\text{Al}_e$  (-0.71) y la saturación en Al (-0.83) del complejo de intercambio. Para estas propiedades, el factor correspondiente al primer componente principal explica más de la mitad de su variación. Todas las cargas son positivas, excepto las relacionadas con el Al de intercambio, lo que es lógico porque cuando se incrementa el pH y la capacidad de intercambio catiónico en los suelos, disminuye el Al intercambiable. Es decir, el **factor** que subyace al primer componente principal (**CP1**) es la **reactividad del suelo**.

El segundo componente principal explica casi un 17% de la varianza y a él se asocian con elevadas cargas positivas las concentraciones totales de Fe (0.90), Ti (0.83), Mn (0.79), y Zn (0.75); con moderadas cargas positivas Ca (0.67) y Cu (0.50); con elevada carga negativa Rb (-0.71), y con moderadas cargas negativas K (-0.63), Si (-0.61), P asimilable (-0.89) y Th (-0.53). Los elementos asociados a la parte positiva de este componente suelen presentar concentraciones elevadas en suelos procedentes de la alteración de materiales básicos, mientras que los que tienen cargas negativas suelen presentar mayores concentraciones en suelos derivados de rocas ácidas. Así pues, el **factor** que subyace al segundo componente principal (**CP2**) es la **mineralogía de los suelos** expresada a través de la **composición elemental** de los mismos.



Tabla IV.13. Factores de carga de las propiedades del suelo en cada uno de los componentes principales

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9
pHw	<b>0,82*</b>	0,120	-0,294	0,113	-0,227	0,021	-0,068	0,028	-0,282
pHk	<b>0,86*</b>	0,220	-0,260	0,005	-0,076	0,136	-0,027	0,116	-0,144
pHf	-0,24	0,164	-0,114	<b>0,666</b>	-0,020	0,049	-0,429	0,222	0,114
C	-0,11	-0,079	<b>0,922*</b>	-0,217	-0,021	-0,070	-0,019	-0,116	0,025
N	-0,05	-0,024	<b>0,946*</b>	-0,196	0,019	-0,061	0,012	0,070	-0,004
CN	-0,26	-0,274	0,089	-0,032	0,039	-0,003	-0,040	<b>-0,842*</b>	-0,053
H	-0,02	0,088	<b>0,930*</b>	-0,090	-0,041	-0,069	-0,059	-0,126	0,067
PoI	0,25	<b>-0,588</b>	0,176	-0,007	0,333	0,009	-0,073	0,026	0,045
Ale	<b>-0,71*</b>	-0,147	0,434	0,059	0,097	-0,200	0,193	-0,119	0,219
Cae	<b>0,89*</b>	-0,002	0,209	-0,095	-0,064	0,089	0,090	-0,124	0,037
Mge	<b>0,90*</b>	0,009	0,049	-0,126	0,103	-0,170	0,002	-0,020	0,207
Nae	<b>0,54</b>	-0,293	0,389	-0,251	-0,273	0,372	0,052	-0,116	0,000
Ke	0,47	-0,299	<b>0,544</b>	-0,109	0,140	0,301	0,016	-0,154	-0,059
SB	<b>0,95*</b>	-0,016	0,135	-0,132	0,042	-0,062	0,034	-0,064	0,153
CICe	<b>0,79*</b>	-0,103	0,355	-0,141	0,101	-0,157	0,127	-0,129	0,270
SBp	<b>0,85*</b>	0,120	-0,111	-0,241	-0,133	0,187	0,015	0,091	-0,248
SatAl	<b>-0,83*</b>	-0,069	0,103	0,263	0,109	-0,182	-0,028	-0,081	0,267
Ca	0,47	<b>0,673</b>	-0,146	-0,140	-0,121	-0,035	0,279	0,122	0,075
Mg	<b>0,73*</b>	0,308	-0,108	-0,030	0,193	-0,251	-0,025	0,014	0,151
K	-0,27	<b>-0,631</b>	-0,240	<b>0,551</b>	-0,100	0,133	0,075	0,226	0,117
P	-0,33	-0,078	-0,002	<b>0,796*</b>	-0,047	-0,191	-0,090	0,059	-0,067
Si	-0,13	<b>-0,607</b>	<b>-0,700*</b>	-0,185	0,108	0,062	0,003	0,040	-0,069
Al	-0,28	0,259	-0,266	<b>0,802*</b>	0,080	0,004	-0,071	-0,165	-0,145
Fe	0,31	<b>0,897*</b>	-0,018	0,092	0,005	0,021	0,083	0,095	0,124
Ti	-0,09	<b>0,831*</b>	0,009	0,270	0,124	0,159	0,139	-0,028	-0,229
Cu	-0,25	<b>0,501</b>	-0,142	-0,142	-0,140	0,288	-0,208	0,138	<b>0,628</b>
Ni	<b>0,71*</b>	0,293	-0,089	-0,083	0,176	-0,379	0,148	0,194	0,066
Cr	<b>0,60</b>	0,335	-0,092	-0,126	-0,012	-0,332	0,263	0,243	0,041
Mn	0,42	<b>0,795*</b>	-0,053	0,119	-0,093	0,089	-0,161	0,178	0,109
Zn	0,18	<b>0,747*</b>	0,107	0,124	-0,093	0,210	-0,066	0,199	0,405
Pb	-0,25	<b>-0,603</b>	0,181	<b>0,48</b>	0,093	-0,019	0,107	0,175	0,207
As	0,07	-0,192	0,023	-0,169	<b>0,873</b>	-0,013	-0,094	-0,088	0,010
Br	-0,24	-0,049	<b>0,782*</b>	0,099	-0,110	0,064	-0,084	0,256	-0,218
Rb	-0,19	<b>-0,709*</b>	-0,151	<b>0,54</b>	-0,162	0,148	0,051	0,131	0,082
Sr	0,25	0,106	-0,108	-0,055	-0,014	0,013	<b>0,879*</b>	0,060	-0,047
Ga	-0,39	0,093	-0,086	<b>0,826*</b>	-0,174	0,191	0,095	-0,064	-0,026
Y	-0,07	0,298	-0,211	0,214	0,056	<b>0,760*</b>	0,005	0,067	0,131
Zr	-0,35	-0,044	-0,237	0,129	<b>0,824*</b>	0,063	0,128	0,061	-0,072
Nb	-0,24	-0,287	-0,134	<b>0,600</b>	0,267	0,420	0,310	-0,154	-0,089
Th	-0,29	<b>-0,532</b>	-0,323	<b>0,50</b>	0,029	0,174	0,059	-0,132	0,116

En negrita aparecen señaladas los factores de carga mayores de 0.5; en rojo si son positivas y en azul si son negativas. Se marcan con un asterisco las cargas de aquellas propiedades para las cuales el componente explica al menos un 50% de la varianza de dicha propiedad (es decir, factores de carga mayores de 0.7).

El tercer componente principal explica un 13% de la varianza total y a el se asocian con elevadas cargas positivas los contenidos de C, N e H ( $>0.92$ ) y Br (0.78), y con carga negativa el Si (-0.70). El **factor** que se identifica con este componente (CP3) es el **contenido de materia orgánica** del suelo: a mayor contenido en materia orgánica mayor contenido en elementos biófilos (C, N, H) y unidos a la materia orgánica (Br) y menor contenido (por dilución relativa) de los elementos mayoritarios de la fracción mineral (de ahí la carga negativa del Si; aunque este efecto no es el responsable único de la variación de las concentraciones de este elemento).

El cuarto componente principal (**CP4**) explica un 11% de la varianza total y a él se asocian con cargas positivas Ga (0.83), Al (0.80), P totales (0.80), y con cargas moderadas el pH en fluoruro sódico (0.67), Nb (0.60), K (0.55), Rb (0.54), Th (0.50) y, en menor medida, Pb (0.48). El **factor** que subyace a este componente parece estar relacionado fundamentalmente a la **química del Al** en los suelos ácidos (como se verá más adelante).

El quinto componente principal (CP5) explica un 5% de la varianza poblacional y a él están asociados el As (0.87) y el Zr (0.82). A partir de este componente, los demás sólo presentan una única propiedad asociada, de manera que componente y propiedad son lo mismo: al sexto (CP6, ~5% de varianza) el Y (0.82), al séptimo (CP7, ~4%) el Sr (0.82), al octavo (CP8, ~4%) el grado de evolución de la materia orgánica a través de la relación C/N (0.82) y al noveno (CP9, 3%) el Cu (0.82).

La proporción de varianza de cada propiedad química explicada por el conjunto de factores significativos (extracción de la comunalidad) se representa en la Figura IV.11. La longitud total de cada una de las barras es la comunalidad, mientras que las secciones indican qué parte de la comunalidad es explicada por cada uno de los factores significativos.

A excepción del P extraíble (Pol), todas las variables mostraron una alta comunalidad; lo que quiere decir que su variación en los suelos estudiados se puede explicar adecuadamente por el conjunto de factores identificados. De las cuarenta propiedades analizadas, veinticuatro están asociadas fundamentalmente a un único factor; otras once (Figura IV.11) dependen al menos de dos factores. Así, un 40% de la varianza del K total está asociada a la composición mineralógica (CP1), mientras que un 30% tiene que ver con el factor relacionado con la química del Al (CP4). La variabilidad del K de intercambio se encuentra asociada en un 30% al contenido de materia orgánica (CP3) y un 22% a la reactividad del suelo (CP1). Para el Ca total el 45% de su varianza se asocia a la composición mineralógica (CP2) y un 22% tiene que ver con la reactividad del suelo (CP1). El Pb, Rb y Th también se asocian fundamentalmente a la composición elemental (CP2), pero en torno a un 25% de su variabilidad también tiene que ver con la química del Al (CP4).

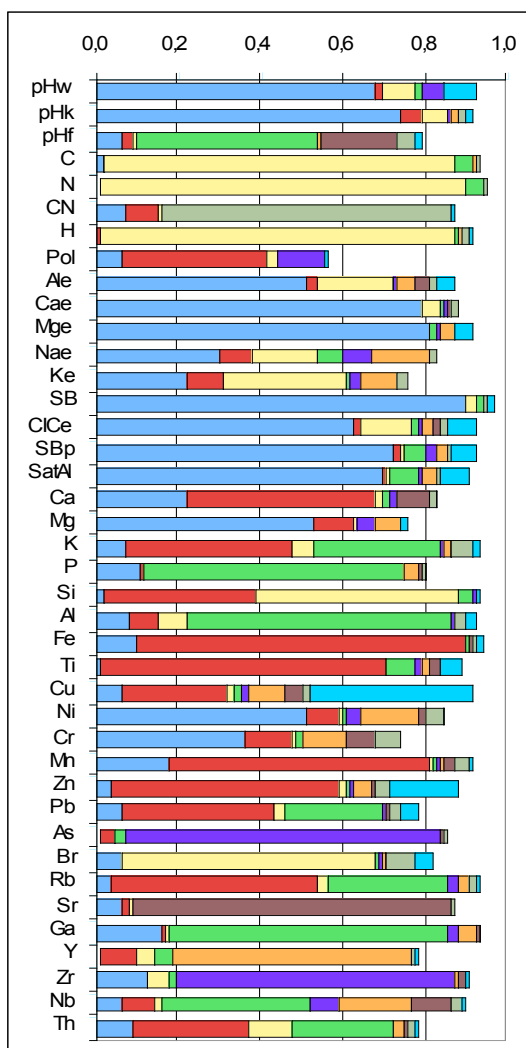


Figura IV.11. Extracción de la comunalidad para cada variable (propiedad química) estudiada en los suelos de brezal. Código de color: CP1=Factor reactividad del suelo (azul), CP2=Factor composición mineralógica expresada a través de la composición elemental (rojo), CP3= Factor contenido de materia orgánica (amarillo), CP4= Factor química el Al (verde), CP5 (violeta), CP6 (naranja), CP7 (marrón), CP8 (verde oliva) y CP9 (turquesa).

La Figura IV.12 muestra la representación cartesiana de las puntuaciones más elevadas de cada propiedad química para el factor reactividad del suelo (CP1) frente al factor composición elemental mineral (CP2), factor contenido de materia orgánica (CP3) y factor química del Al (CP4). Así para la reactividad y la composición elemental del suelo (CP1-CP2) las propiedades que tienen que ver con una reacción del suelo ligeramente ácida a ligeramente alcalina se localizan sobre el eje 1 a la derecha (Ca y Mg de cambio y suma de bases) y con signo contrario están el  $Al_e$  y la saturación de Al. Para el K y el Na de intercambio aunque la mayor parte de su variabilidad se explica por la reactividad del suelo, una parte importante de su varianza está asociada a la composición elemental. En la parte positiva del eje 2 están los elementos que dominan la mineralogía de rocas básicas (Ti, Zn, Fe) junto con Mn, Cu y Ca, aunque estos tres últimos elementos también con influencia del eje 1. En la parte negativa del eje 2 se localizan los elementos asociados mayoritariamente a suelos derivados de rocas ácidas: Si, Pb, Th, K y Rb.

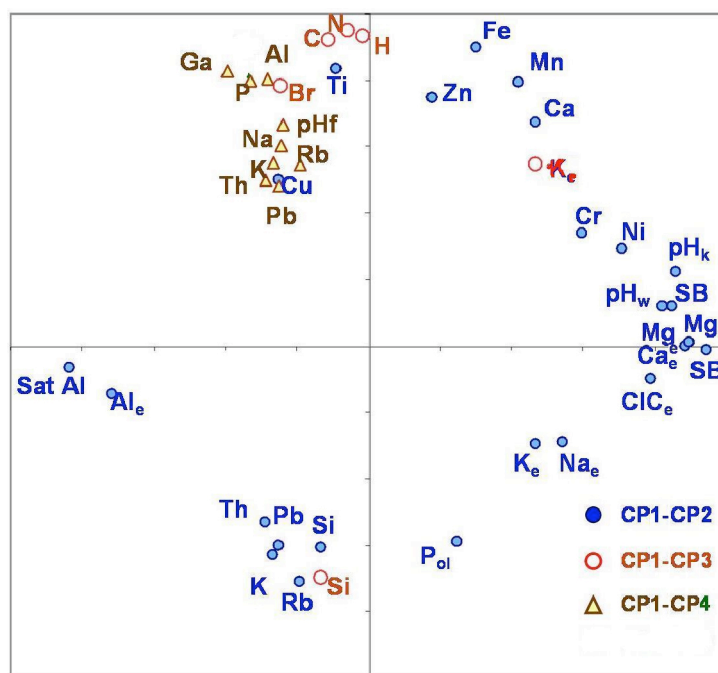


Figura IV.12. Diagrama cartesiano que representa las puntuaciones significativas para cada propiedad del suelo. Los códigos de color se corresponden con cada proyección binaria siempre en combinación con el primer componente principal (CP1, identificado como factor reactividad de los suelos de brezal), CP2= Factor composición mineralógica; CP3= Factor contenido de materia orgánica y CP4= química del Al.

En la Figura IV.13 se pueden ver las proyecciones cartesianas de las puntuaciones de las muestras para el los nueve componentes principales significativos (fijando el CP1 como eje abscisas en todos los casos).

En la proyección CP1-CP2 (reactividad del suelo-composición mineralógica) en la mitad izquierda están las muestras que tienen puntuaciones negativas para el CP1, es decir, los suelos que tienen reacción más ácida: suelos sobre granitos, cuarcitas, pizarras, sedimentos orgánicos, que tienen además puntuaciones negativas en el eje 2 debido a que su composición elemental está dominada por elementos mayoritarios en rocas ácidas. Con reacción ácida pero con mineralogía de rocas básicas en el cuadrante izquierdo arriba están los suelos sobre las anfibolitas de la mina de Touro y los gabros de los suelos más evolucionados. A la derecha la mitad dominada por reacción con tendencia neutra: suelos sobre rocas ultrabásicas y los suelos sobre gabros con edafogénesis más incipiente; y abajo con mineralogía de rocas ácidas: los suelos de pH elevado en los suelos de sedimentos cuaternarios costeros, etc.

En la proyección CP1-CP3 (reactividad del suelo-cantidad de materia orgánica) destacan en el eje 2 con las puntuaciones más elevadas los suelos sobre sedimentos orgánicos que presentan los contenidos más elevados de materia orgánica.

En la proyección CP1-CP4 (reactividad del suelo-química del Al) en la mitad izquierda los suelos sobre granitos, esquistos y los gabros más evolucionados de Monte Castelo y los Histosoles y Arenosoles (procedentes de sedimentos cuaternarios costeros) son los que tienen las puntuaciones más negativas en eje 2.

En la proyección CP1-CP5 (reactividad del suelo-elevados contenidos de As y Zr) destacan con puntuaciones positivas en el eje 2 las muestras sobre cuarcitas que tienen las concentraciones más elevadas en estos dos elementos traza.

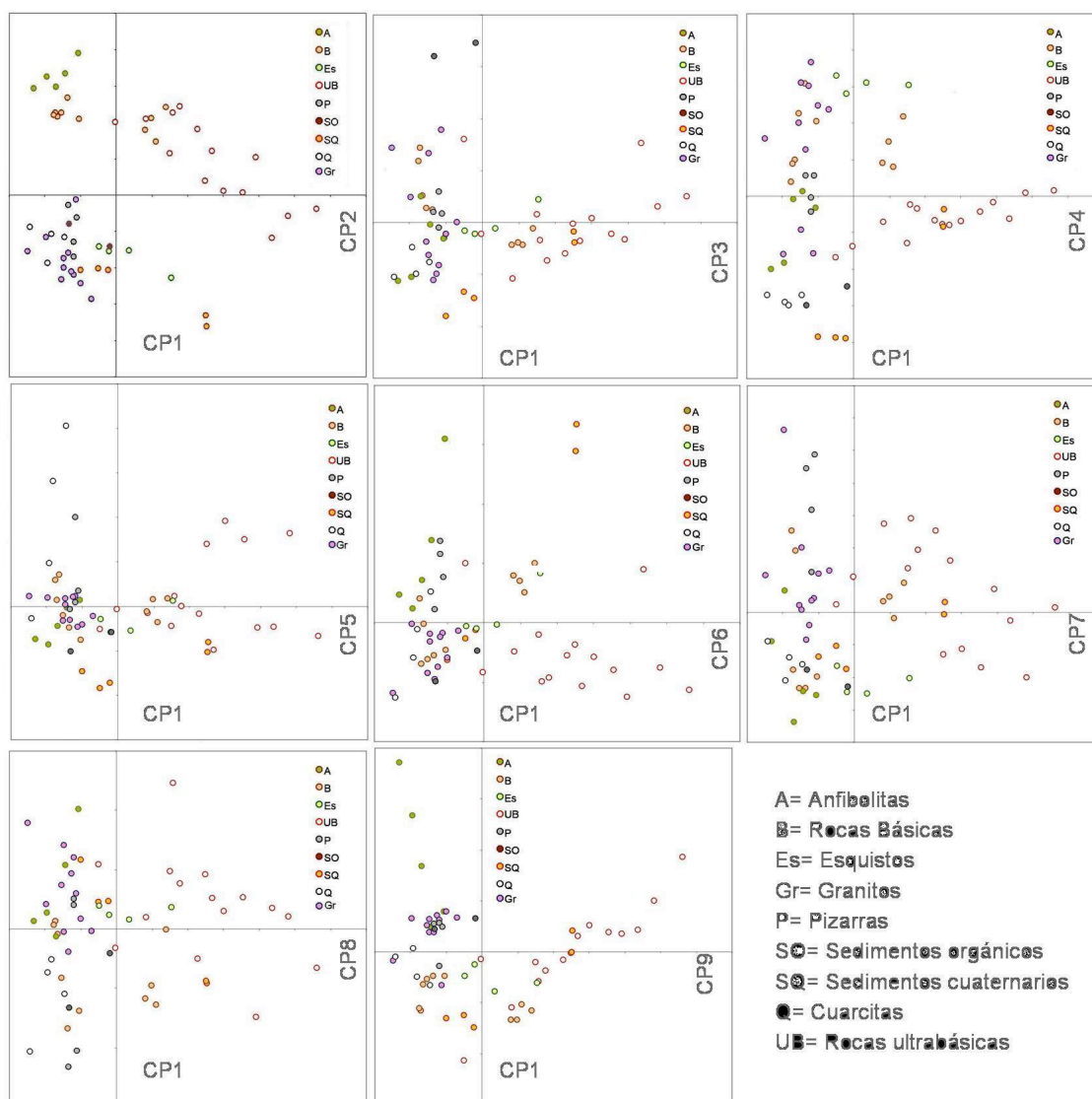


Figura IV. 13. Proyecciones cartesianas de las puntuaciones de las muestras de suelos de brezal estudiados. El primer componente principal (CP1) es el eje de abscisas, mientras que los demás (CP2 a CP9) van en el eje de ordenadas.

En la proyección CP1-CP6 (reactividad del suelo-contenido en Y) destacan dos de las muestras de suelos sobre los sedimentos cuaternarios (SQ2) y uno de anfibolitas. De manera que a partir de aquí para cada proyección se asocia a unas muestras con una composición particular que hace que sus puntuaciones en el eje 2 sean las más elevadas. Para CP1-CP7 (reactividad del suelo-contenido de Sr) destacan algunos suelos de pizarras con elevados contenidos en este metal, CP1-CP8 (reactividad del suelo-grado de evolución de la materia orgánica) destacan los suelos sobre anfibolitas que tienen muy bajas relaciones C/N. Y para la proyección CP1-CP9 (reactividad del suelo-contenido en Cu) destacan los suelos de la mina de Touro, con elevados contenidos de Cu.

## IV.3.9. MATRICES DE CORRELACIÓN

Se han hecho también matrices de correlación entre las propiedades individuales de los suelos. En la Tabla IV.14 aparecen todas las correlaciones que son significativas para las variables estudiadas ( $p < 0.05$ ) y en negrita si éstas son muy significativas ( $p < 0.01$ ). El código de colores es el mismo que se utilizó en la gráfica de factores de carga del análisis factorial: Factor reactividad de suelo (azul), factor composición mineralógica (rojo), factor contenido de materia orgánica (amarillo) y factor química del Al (verde). Así pues, las correlaciones binarias entre las propiedades que vienen explicadas por el análisis de componentes principales se señalan con el color asociado a cada uno de ellos. Como es lógico las propiedades que estaban fuertemente asociadas a un componente principal covarían. Así por ejemplo, presentan valores de correlación mayores o iguales a 0.7 C y N (0.96); pH en agua, pH en KCl, capacidad de intercambio, suma de bases,  $\text{Ca}_e$  y  $\text{Mg}_e$  de cambio; también Pb, Th y K, que son elementos asociados fundamentalmente a rocas ácidas. Destacan además las elevadas correlaciones entre elementos que se sustituyen isomórficamente en las estructuras minerales: K y Rb (0.94), o Al y Ga (0.82).

Tabla IV.14. Matriz de correlaciones significativas ( $p < 0.05$ ) entre las propiedades químicas determinadas en los suelos de brezal. En negrita se señalan las correlaciones que son muy significativas ( $p < 0.01$ ) y en cursiva si son  $\geq 0.7$

	C	N	Pol	P	Cae	Ca	Mge	Mg	Ke	K	pHw	pHk	pHf	SB	ClCe	Nae	Br
n°	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79
N	<b>0,96</b>																
Cae			0,23	-0,34													
Ca	-0,23		-0,24	-0,27	<b>0,49</b>												
Mge				-0,38	<b>0,75</b>	<b>0,42</b>											
Mg				-0,26	<b>0,55</b>	<b>0,62</b>	<b>0,76</b>										
Ke	<b>0,43</b>	<b>0,45</b>	<b>0,35</b>	-0,26	<b>0,65</b>		<b>0,40</b>										
K	-0,22			<b>0,48</b>	-0,27	-0,44	-0,29	-0,36									
pHw	-0,29	-0,23			<b>0,70</b>	<b>0,45</b>	<b>0,67</b>	<b>0,58</b>	<b>0,30</b>								
pHk	-0,27			-0,31	<b>0,73</b>	<b>0,57</b>	<b>0,72</b>	<b>0,63</b>	<b>0,34</b>		<b>0,92</b>						
pHf			-0,24	<b>0,40</b>	-0,27			-0,23	<b>0,35</b>								
SB			0,21	-0,40	<b>0,90</b>	<b>0,46</b>	<b>0,96</b>	<b>0,71</b>	<b>0,56</b>	-0,30	<b>0,72</b>	<b>0,77</b>	-0,24				
ClCe	0,27	<b>0,30</b>	0,22	-0,25	<b>0,79</b>	<b>0,28</b>	<b>0,89</b>	<b>0,58</b>	<b>0,58</b>	-0,30	<b>0,46</b>	<b>0,52</b>	-0,32	<b>0,91</b>			
Nae	<b>0,31</b>	<b>0,32</b>	0,22	-0,40	<b>0,70</b>		<b>0,47</b>		<b>0,74</b>		<b>0,42</b>	<b>0,45</b>	-0,34	<b>0,63</b>	<b>0,58</b>		
Br	<b>0,65</b>	<b>0,74</b>		<b>0,37</b>				-0,31	<b>0,33</b>		-0,23						
Ale	<b>0,42</b>	<b>0,40</b>		<b>0,47</b>	-0,58	-0,51	-0,53	-0,51			-0,76	-0,74		-0,57		-0,36	<b>0,46</b>
Al	-0,32	-0,29	-0,29	<b>0,57</b>	-0,36					<b>0,35</b>			<b>0,63</b>	-0,40	-0,46	-0,50	
Ga			-0,35	<b>0,67</b>	-0,40					<b>0,59</b>			<b>0,55</b>	-0,47	-0,45	-0,34	
Si	<b>-0,56</b>	<b>-0,61</b>	0,27		-0,27	-0,42		-0,23	-0,27	<b>0,30</b>		-0,25	-0,29	-0,23	-0,25	-0,22	<b>-0,43</b>
Fe			-0,38		<b>0,30</b>	<b>0,80</b>	<b>0,30</b>	<b>0,51</b>		-0,44	<b>0,33</b>	<b>0,50</b>		<b>0,30</b>			
Ti			-0,44			<b>0,48</b>				-0,33			0,23		-0,23		
Mn			-0,30		<b>0,43</b>	<b>0,75</b>	<b>0,36</b>	<b>0,52</b>		-0,42	<b>0,50</b>	<b>0,62</b>	<b>0,30</b>	<b>0,40</b>			
Cu	-0,22	-0,22	-0,37			<b>0,34</b>			-0,29		-0,29						
Zn			-0,30		<b>0,29</b>	<b>0,70</b>		<b>0,36</b>		-0,27		<b>0,36</b>	0,25	0,24			
Ni				-0,28	<b>0,52</b>	<b>0,53</b>	<b>0,76</b>	<b>0,71</b>		-0,34	<b>0,58</b>	<b>0,64</b>		<b>0,70</b>	<b>0,60</b>		-0,26
Cr				-0,30	<b>0,48</b>	<b>0,68</b>	<b>0,58</b>	<b>0,54</b>		-0,31	<b>0,50</b>	<b>0,55</b>		<b>0,57</b>	<b>0,44</b>	0,27	-0,22
Sr				-0,27	<b>0,34</b>	<b>0,42</b>	0,28	0,24			<b>0,34</b>	<b>0,40</b>		<b>0,32</b>	0,24		
Pb			<b>0,34</b>	<b>0,44</b>		<b>0,42</b>	-0,22	-0,31		<b>0,74</b>	-0,24	-0,27					0,23
Rb				<b>0,44</b>		-0,50	-0,23	-0,36		<b>0,94</b>			<b>0,36</b>	-0,23	-0,22		
Y	-0,25		-0,23										<b>0,34</b>		-0,27		
Nb													0,24	-0,31	-0,27		
Th	-0,34	-0,41		<b>0,38</b>	-0,35	-0,51	-0,34	-0,41		<b>0,71</b>		-0,32	<b>0,23</b>	-0,37	-0,37	-0,22	
Zr					-0,45	-0,32	-0,32	-0,23	-0,22		-0,39	-0,36		-0,40	-0,33	-0,50	
As									0,25		-0,39	-0,36		-0,40	-0,33	-0,50	

	Ale	Al	Ga	Si	Fe	Ti	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Sr	Pb	Rb	Y	Nb	Th
nº	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79
Ga	0,25	0,82															
Fe	-0,34			-0,65													
Ti		0,47	0,36	-0,55	0,74												
Mn	-0,46			-0,57	0,90	0,58											
Cu					0,46	0,24	0,40										
Zn	-0,31			-0,60	0,83	0,58	0,81	0,67									
Ni	-0,46		-0,37	-0,23	0,45	0,48			0,22								
Cr	-0,47	-0,28	-0,39	-0,26	0,53	0,57			0,38	0,71							
Sr	-0,24				0,28					0,34	0,36						
Pb	0,25		0,36		-0,41	-0,33	-0,39	-0,22		-0,27	-0,24						
Rb		0,32	0,56	0,29	-0,53	-0,42	-0,47		-0,36	-0,33	-0,34		0,71				
Y		0,33	0,44		0,24	0,30	0,24	0,33	0,29								
Nb		0,54	0,63		-0,33	-0,37	-0,29	-0,28	-0,33	-0,36			0,44	0,62	0,45		
Th		0,40	0,46	0,48	-0,49	-0,31	-0,49		-0,34	-0,37	-0,40		0,56	0,71	0,25	0,60	
Zr	0,30	0,30		0,34	-0,23		-0,35	-0,29			-0,25					0,46	0,36

Código de colores de las propiedades químicas (reacción del suelo en azul, mineralogía expresada a través de la composición elemental en rojo, materia orgánica en amarillo y química del Al en verde).

#### IV.3.10. ANÁLISIS DE VARIANZA EN FUNCIÓN DE LA ESPECIE DE BREZO

Se ha realizado un ANOVA con el test Tuckey B para ver si existen diferencias en las propiedades de los suelos de brezal en función de las especies de brezos presentes, encontrándose diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) para los parámetros que se muestran en la Tabla IV.15.

Los valores de pH en agua más bajos se encuentran en los suelos de *E. mackaiana*, que presenta valores significativamente inferiores a los de *E. erigena* y *E. vagans*. Con respecto a las bases de cambio, los suelos de *E. erigena* destacan por presentar los valores medios más elevados de Na y Ca de cambio los valores más elevados de Mg cambiante se encuentran en los suelos de *E. vagans* y *E. scoparia*, así como la suma de bases.

Respecto a la composición elemental cabe destacar los bajos valores de K y el mayor contenido de Mg en los suelos de *E. vagans*, mientras que en los suelos de *D. cantabrica* muestran la tendencia inversa. Los suelos de *E. scoparia* también muestran niveles altos de Mg total. En concordancia con estos resultados, cabe referir que los suelos en los que crecen *E. vagans* y *E. scoparia* presentan valores significativamente mayores de Cr y Ni, elementos abundantes en rocas serpentínicas. Los suelos en los que se desarrolla *E. erigena* sobresalen por el elevado contenido de Ca y el bajo nivel de K. Por otro lado, los suelos de *E. mackaiana* y *E. arborea* destacan por su mayor acidez y bajas concentraciones de elementos totales en correspondencia con la litología de la que proceden.

Estos resultados reflejan no tanto la influencia de la planta sobre el suelo como la naturaleza del propio material de partida edáfico pues sólo se han encontrado diferencias significativas en las propiedades de los suelos, imputables al factor especie cuando dichas propiedades muestran valores extremos. Esto se explica porque la presencia de estas especies se limita a litologías muy particulares en sus áreas de distribución en Galicia: serpentinitas en el caso de *E. scoparia* y *E. vagans* (pH, S, Mg, Cr y Ni); *E. erigena* de sedimentos gabros y cuaternarios costeros (Na y Ca de cambio). *E. tetralix* procede de suelos sobre gabros (Fe y Al totales).

En estos casos las especies son indicadoras del ambiente geoquímico en que se encuentran y las diferencias entre suelos vienen dadas por lo restringido de sus hábitats tan particulares. Sin embargo, las especies más ubicuistas no han destacado para ninguna propiedad el suelo, salvo el caso de *Daboecia cantabrica*.

Tabla IV.15. pH en agua, P Olsen, P total; Ca, Mg y Na de cambio y suma de bases en los suelos de las distintas especies de brezos.

	N	pH H <sub>2</sub> O	P Olsen mg kg <sup>-1</sup>	P total %	Ca <sub>e</sub>	Mg <sub>e</sub> cmol(+) kg <sup>-1</sup>	Na <sub>e</sub> cmol(+) kg <sup>-1</sup>	SB
<i>C. vulgaris</i>	18	(5.22) <sup>abc</sup>	(4.15) <sup>ab</sup>	(0.05) <sup>abc</sup>	(2.85) <sup>abc</sup>	(5.31) <sup>ab</sup>	(0.44) <sup>ab</sup>	(8.94) <sup>ab</sup>
<i>D. cantabrica</i>	5	(4.74) <sup>ab</sup>	(5.24) <sup>ab</sup>	(0.14) <sup>c</sup>	(2.05) <sup>abc</sup>	(0.86) <sup>a</sup>	(0.24) <sup>a</sup>	(3.44) <sup>a</sup>
<i>E. cinerea</i>	18	(4.84) <sup>abc</sup>	(3.69) <sup>ab</sup>	(0.07) <sup>abc</sup>	(1.38) <sup>ab</sup>	(1.34) <sup>a</sup>	(0.33) <sup>ab</sup>	(3.35) <sup>a</sup>
<i>E. ciliaris</i>	7	(5.19) <sup>abc</sup>	(3.98) <sup>ab</sup>	(0.10) <sup>abc</sup>	(2.67) <sup>abc</sup>	(1.92) <sup>ab</sup>	(0.48) <sup>ab</sup>	(5.42) <sup>ab</sup>
<i>E. tetralix</i>	1	(5.05) <sup>abc</sup>	(2.12) <sup>a</sup>	(0.13) <sup>bc</sup>	(0.64) <sup>a</sup>	(0.24) <sup>a</sup>	(0.49) <sup>ab</sup>	(1.58) <sup>a</sup>
<i>E. mackaiana</i>	7	(4.40) <sup>a</sup>	(6.39) <sup>b</sup>	(0.03) <sup>a</sup>	(2.59) <sup>abc</sup>	(2.31) <sup>ab</sup>	(0.66) <sup>ab</sup>	(5.99) <sup>ab</sup>
<i>E. erigena</i>	2	(5.82) <sup>bc</sup>	(4.00) <sup>ab</sup>	(0.08) <sup>abc</sup>	(5.70) <sup>c</sup>	(3.86) <sup>ab</sup>	(0.78) <sup>b</sup>	(10.67) <sup>ab</sup>
<i>E. scoparia</i>	2	(5.51) <sup>abc</sup>	(4.56) <sup>ab</sup>	(0.04) <sup>a</sup>	(4.19) <sup>abc</sup>	(8.89) <sup>ab</sup>	(0.42) <sup>ab</sup>	(13.80) <sup>ab</sup>
<i>E. umbellata</i>	12	(4.67) <sup>ab</sup>	(3.12) <sup>ab</sup>	(0.07) <sup>abc</sup>	(1.00) <sup>ab</sup>	(0.80) <sup>a</sup>	(0.33) <sup>ab</sup>	(2.34) <sup>a</sup>
<i>E. vagans</i>	6	(6.03) <sup>c</sup>	(4.64) <sup>ab</sup>	(0.03) <sup>a</sup>	(5.06) <sup>BC</sup>	(10.39) <sup>b</sup>	(0.63) <sup>ab</sup>	(16.55) <sup>b</sup>
<i>E. australis</i>	2	(4.52) <sup>abc</sup>	(3.47) <sup>ab</sup>	(0.09) <sup>abc</sup>	(4.15) <sup>abc</sup>	(2.01) <sup>ab</sup>	(0.37) <sup>ab</sup>	(6.77) <sup>ab</sup>
<i>E. arborea</i>	1	(4.30) <sup>abc</sup>	(5.05) <sup>ab</sup>	(0.03) <sup>a</sup>	(0.40) <sup>a</sup>	(0.35) <sup>a</sup>	(0.19) <sup>a</sup>	(1.25) <sup>a</sup>

Tabla IV.15 (continuación). Concentración de K, Mg, Al, Fe, Ni y Cr en los suelos de las distintas especies

	N	K %	Mg %	Al %	Fe %	Ni mg kg <sup>-1</sup>	Cr mg kg <sup>-1</sup>
<i>C. vulgaris</i>	18	(0.84) <sup>ab</sup>	(1.30) <sup>ab</sup>	(4.69) <sup>a</sup>	(5.97) <sup>ab</sup>	(510) <sup>ab</sup>	(2672) <sup>ab</sup>
<i>D. cantabrica</i>	5	(2.02) <sup>b</sup>	(0.42) <sup>a</sup>	(5.79) <sup>ab</sup>	(2.06) <sup>a</sup>	(32) <sup>a</sup>	(23) <sup>a</sup>
<i>E. cinerea</i>	18	(1.09) <sup>ab</sup>	(1.02) <sup>ab</sup>	(5.59) <sup>ab</sup>	(5.18) <sup>ab</sup>	(233) <sup>ab</sup>	(919) <sup>ab</sup>
<i>E. ciliaris</i>	7	(1.36) <sup>ab</sup>	(0.65) <sup>ab</sup>	(5.78) <sup>ab</sup>	(4.07) <sup>ab</sup>	(62) <sup>a</sup>	(192) <sup>a</sup>
<i>E. tetralix</i>	1	(0.60) <sup>ab</sup>	(0.29) <sup>a</sup>	(8.85) <sup>b</sup>	(9.64) <sup>b</sup>	(231) <sup>ab</sup>	(650) <sup>a</sup>
<i>E. mackaiana</i>	7	(1.17) <sup>ab</sup>	(0.44) <sup>a</sup>	(3.22) <sup>a</sup>	(3.68) <sup>ab</sup>	(145) <sup>a</sup>	(1461) <sup>ab</sup>
<i>E. erigena</i>	2	(1.11) <sup>ab</sup>	(1.07) <sup>ab</sup>	(5.50) <sup>ab</sup>	(6.27) <sup>ab</sup>	(86) <sup>a</sup>	(501) <sup>a</sup>
<i>E. scoparia</i>	2	(0.48) <sup>ab</sup>	(2.85) <sup>bc</sup>	(4.29) <sup>a</sup>	(8.35) <sup>ab</sup>	(1748) <sup>c</sup>	(6632) <sup>b</sup>
<i>E. umbellata</i>	12	(1.09) <sup>ab</sup>	(0.36) <sup>a</sup>	(5.78) <sup>ab</sup>	(5.40) <sup>ab</sup>	(211) <sup>ab</sup>	(910) <sup>ab</sup>
<i>E. vagans</i>	6	(0.41) <sup>a</sup>	(3.79) <sup>c</sup>	(4.07) <sup>a</sup>	(7.89) <sup>ab</sup>	(1208) <sup>bc</sup>	(4535) <sup>ab</sup>
<i>E. australis</i>	2	(0.58) <sup>ab</sup>	(1.92) <sup>abc</sup>	(6.72) <sup>ab</sup>	(7.76) <sup>ab</sup>	(133) <sup>a</sup>	(635) <sup>a</sup>
<i>E. arborea</i>	1	(0.72) <sup>ab</sup>	(0.07) <sup>a</sup>	(4.25) <sup>a</sup>	(1.27) <sup>a</sup>	(9) <sup>a</sup>	(25) <sup>a</sup>



#### IV.4. ANÁLISIS DE LOS BREZOS

Se ha estudiado la composición elemental de las especies de brezo presentes en Galicia en hojas, tallos y raíces. Debido a que las plantas fueron recogidas fuera de su época de floración, sólo se analizaron las flores cuando la planta las conservaba y en las especies: *Calluna vulgaris*, *Erica cinerea*, *E. mackaiana* y *E. vagans*.

##### IV.4.1. CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS BIÓFILOS

Los porcentajes de C, N y P en las especies de brezo estudiadas en los distintos órganos analizados pueden observarse en las Tabla IV 16 a IV 18. Los contenidos medios para estos tres elementos son superiores en hojas, siendo los contenidos medios de tallos y raíces muy similares entre sí para todas las especies estudiadas.

Las concentraciones más elevadas de C en flores (para las cuatro especies en las que se estudia este órgano) están en *E. vagans* y las más bajas en *C. vulgaris*. Los mayores porcentajes de C en hojas y tallos los presenta *E. tetralix* y en raíces *E. australis*; los menores contenidos en hojas se encuentran en *E. cinerea* y *D. cantabrica*, mientras los valores más bajos de C en tallos y raíces están en *E. arborea* y *E. scoparia*.

Tabla IV.16. % de C en las especies de brezo estudiadas en Galicia

		%C	%C	%C	%C
	N	Flores	Hojas	Tallos	Raíces
<i>Calluna vulgaris</i>	18	47.89±1.63	51.28±0.62	47.68±1.83	46.11±1.90
<i>Daboecia cantabrica</i>	5	---	49.75±0.34	48.53±0.28	50.08±0.90
<i>Erica cinerea</i>	18	48.79±1.11	49.41±1.68	47.75±2.12	47.05±2.32
<i>Erica ciliaris</i>	7	---	50.85±0.59	47.92±1.79	48.59±2.12
<i>Erica tetralix</i>	1	---	53.71±1.07	49.09±0.79	47.47±0.80
<i>Erica mackaiana</i>	7	49.60±1.45	51.30±1.34	48.68±1.04	46.68±1.00
<i>Erica erigena</i>	2	---	50.11±1.89	48.84±2.86	47.93±3.44
<i>Erica scoparia</i>	2	---	52.90±0.24	46.45±1.34	44.55±0.67
<i>Erica umbellata</i>	12	---	50.77±1.13	47.84±1.67	46.24±1.70
<i>Erica vagans</i>	6	50.60±1.19	51.28±0.62	48.39±0.54	47.56±0.55
<i>Erica australis</i>	2	---	53.54±0.26	48.92±1.18	50.12±1.46
<i>Erica arborea</i>	1	---	52.73±1.03	45.82±1.10	44.52±0.95

N= nº de plantas analizadas en cada especie.

Los porcentajes de N en flores resultan ser superiores al 1% en *E. mackaiana* y *E. vagans*, mientras que en *E. cinerea* y *C. vulgaris* están en torno al 0.9%. El porcentaje de N foliar permite diferenciar dos grupos de brezos, uno con medias en torno a 1.2% y otro con valores inferiores, aunque siempre por encima de 0.8% (*E. cinerea*, *E. tetralix*, *E. erigena*, *E. australis* y *E. umbellata*). Para tallos y raíces destacan *E. mackaiana* por sus elevados contenidos (0.9%) y *E. australis* por los más bajos (0.4%).

Tabla IV.17. % de N en las especies de brezo estudiadas en Galicia

	N	%N Flores	%N Hojas	%N Tallos	%N Raíces
<i>C. vulgaris</i>	18	0.95±0.17	1.17±0.11	0.67±0.18	0.59±0.18
<i>D. cantabrica</i>	5	---	1.21±0.10	0.70±0.17	0.56±0.06
<i>E. cinerea</i>	18	0.82±0.20	1.04±0.10	0.55±0.06	0.51±0.06
<i>E. ciliaris</i>	7	---	1.20±0.15	0.54±0.09	0.57±0.08
<i>E. tetralix</i>	1	---	0.92±0.10	0.50±0.09	0.55±0.07
<i>E. mackaiana</i>	7	1.20±0.14	1.20±0.07	0.88±0.18	0.94±0.10
<i>E. erigena</i>	2	---	0.89±0.14	0.64 ±0.10	0.54±0.03
<i>E. scoparia</i>	2	---	1.19±0.06	0.64±0.01	0.52±0.03
<i>E. umbellata</i>	12	---	1.13±0.12	0.60±0.09	0.47±0.08
<i>E. vagans</i>	6	1.15±0.09	1.23±0.07	0.77±0.11	0.70±0.11
<i>E. australis</i>	2	---	1.12±0.10	0.43±0.06	0.42±0.04
<i>E. arborea</i>	1	---	1.22±0.12	0.70±0.05	0.58±0.03

N= nº de plantas analizadas en cada especie.

Los porcentajes más altos de P en flores los presenta *E. vagans* y los más bajos *E. cinerea*. Para el P foliar las medias están en torno 2000 mg kg<sup>-1</sup> para *C. vulgaris*, *E. cinerea*, *E. ciliaris*, *E. tetralix* y *E. scoparia*. Las mayores concentraciones están *D. cantabrica* y *E. australis* y las más baja en *E. mackaiana*. Valores intermedios los presentan *E. erigena* y *E. vagans*.

Los contenidos de P en las especies de brezo más comunes en Galicia están dentro del rango encontrado por González *et al.* (2002).

Tabla IV.18. Concentración de P (mg kg<sup>-1</sup>) en las especies de brezo

	N	P Flores	P Hojas	P Tallos	P Raíces
<i>C. vulgaris</i>	18	1733±558	2009±428	1222±303	1141±331
<i>D. cantabrica</i>	5	---	2595±281	1854±145	1686±82
<i>E. cinerea</i>	18	1380±576	2040±646	1480±393	1182±381
<i>E. ciliaris</i>	7	---	2037±413	1351±405	1279±350
<i>E. tetralix</i>	1	---	1978±70	1567±45	1494±35
<i>E. mackaiana</i>	7	1544±377	1355±232	1278±607	868±146
<i>E. erigena</i>	2	---	1592±597	1201±627	1244±554
<i>E. scoparia</i>	2	---	2148±527	1228±279	794±224
<i>E. umbellata</i>	12	---	2199±900	1417±403	1136±387
<i>E. vagans</i>	6	1845±1033	1520±444	838±218	787±129
<i>E. australis</i>	2	---	2460±757	1356±292	1551±132
<i>E. arborea</i>	1	---	2313±95	2373±90	2592±75

## IV.4.2. CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS MAYORITARIOS

En general se aprecia que las concentraciones más elevadas de Ca, Mg, Na y K se encuentran en hojas y siguen en orden decreciente de importancia tallos y raíces. Al comparar estos dos últimos compartimentos destacan *E. tetralix*, *E. erigena* y *E. vagans* porque presentan concentraciones de Ca y Mg en la raíz mayores que en tallo.

Los contenidos de Ca en flores son similares en todas las especies (Tabla IV.19). Los mayores valores de Ca en hojas los presenta *E. erigena* (con una notable diferencia con respecto a las demás) seguida de *E. tetralix* y *E. cinerea*; las concentraciones menores se encuentran en *E. mackaiana* y *E. australis*. En cuanto a los tallos las mayores niveles están en *E. erigena* y *E. australis* y los más bajos en *E. scoparia* y *E. ciliaris*. Para raíces destacan las concentraciones más elevadas, superiores a  $1700 \text{ mg kg}^{-1}$ , en *E. scoparia* y *E. vagans*; los valores más bajos, inferiores a  $900 \text{ mg kg}^{-1}$ , están en *E. arborea* y *E. australis*.

Tabla IV.19. Concentración de Ca ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en las especies de brezo

	N	Ca Flores	Ca Hojas	Ca Tallos	Ca Raíces
<i>C. vulgaris</i>	18	2169±404	3345±748	1538±501	1087±587
<i>D. cantabrica</i>	5	---	4039±751	1854±700	1020±200
<i>E. cinerea</i>	18	2674±679	4198±862	1610±624	1164±523
<i>E. ciliaris</i>	7	---	3857±1517	1276±409	985±264
<i>E. tetralix</i>	1	---	5830±210	1909±195	2376±180
<i>E. mackaiana</i>	7	2359±475	2513±432	1617±430	1190±609
<i>E. erigena</i>	2	---	7523±3150	2335±171	1574±107
<i>E. scoparia</i>	2	---	3449±779	1155±84	1735±1089
<i>E. umbellata</i>	12	---	2892±1290	1572±656	900±406
<i>E. vagans</i>	6	2198±414	3139±1080	1542±303	1768±738
<i>E. australis</i>	2	---	2628±1057	3273±1174	773±470
<i>E. arborea</i>	1	---	2844±110	1840±70	855±30

N= nº de plantas analizadas en cada especie.

Los contenidos más altos de Mg en flores los presenta *E. vagans* y los más bajos *E. mackaiana*. (Tabla IV.20). Para el Mg foliar los valores más altos están en *D. cantabrica* y *E. erigena*, y los más bajos en *E. australis* y *E. mackaiana*. Con respecto al Mg en tallos *E. erigena*, *D. cantabrica* y *E. arborea* presentan valores en torno a  $900 \text{ mg kg}^{-1}$ , que son los más altos, mientras que *E. australis*, *E. tetralix* y *E. scoparia*, presentan las concentraciones por debajo de  $700 \text{ mg kg}^{-1}$ . En cuanto a las raíces y de forma similar a los comentado para el Ca, destacan de nuevo los altos valores de *E. vagans* y *E. scoparia*, y los bajos valores de *E. australis* y *E. arborea*.

Tabla IV.20. Concentración de Mg (mg kg<sup>-1</sup>) en las especies de brezo

	N	Mg Flores	Mg Hojas	Mg Tallos	Mg Raíces
<i>C. vulgaris</i>	18	1374±484	1671±484	749±424	692±476
<i>D. cantabrica</i>	5	---	2443±307	915±186	589±275
<i>E. cinerea</i>	18	1521±557	2333±761	834±490	703±472
<i>E. ciliaris</i>	7	---	1938±544	705±285	625±189
<i>E. tetralix</i>	1	---	2282±150	640±35	981±72
<i>E. mackaiana</i>	7	1007±275	1483±398	754±314	745±606
<i>E. erigena</i>	2	---	2448±507	949±169	640±170
<i>E. scoparia</i>	2	---	2274±175	685±92	1785±1153
<i>E. umbellata</i>	12	---	1655±572	789±400	480±170
<i>E. vagans</i>	6	1854±403	2121±530	845±350	1635±574
<i>E. australis</i>	2	---	1394±312	581±245	453±308
<i>E. arborea</i>	1	---	1608±42	891±25	357±15

N= nº de plantas analizadas en cada especie.

Los contenidos de Ca en las especies de brezo más comunes en Galicia están dentro del rango encontrado por González *et al.* (2000), resultando superiores las concentraciones de Mg y K obtenidas en el presente estudio.

En cuanto al Na destaca la especie *E. erigena* por presentar los contenidos más elevados en los tres compartimentos (Tabla IV.21). Los contenidos más altos en flores los presenta *E. mackaiana*. Los valores más bajos de Na foliar se encuentran en *D. cantabrica* y *E. umbellata*; los valores más bajos en tallos se encuentran en *E. australis* y *E. arborea*; y en raíces de nuevo en *E. australis*.

Tabla IV.21. Concentración de Na (mg kg<sup>-1</sup>) en las especies de brezo

	N	Na Flores	Na Hojas	Na Tallos	Na Raíces
<i>C. vulgaris</i>	18	796±340	1246±338	495±143	419±169
<i>D. cantabrica</i>	5	---	990±246	665±234	314±301
<i>E. cinerea</i>	18	526±191	1950±788	897±381	343±223
<i>E. ciliaris</i>	7	---	1359±323	866±417	369±239
<i>E. tetralix</i>	1	---	1341±89	909±60	358±25
<i>E. mackaiana</i>	7	1296±684	1395±224	681±186	528±239
<i>E. erigena</i>	2	---	3593±2782	1385±46	526±443
<i>E. scoparia</i>	2	---	1167±621	825±206	390±16
<i>E. umbellata</i>	12	---	881±346	565±270	338±193
<i>E. vagans</i>	6	523±115	1202±320	677±286	404±171
<i>E. australis</i>	2	---	1051±421	389±103	145±50
<i>E. arborea</i>	1	---	1037±15	370±16	391±13

Los contenidos más altos de K en flores se encuentran en *E. vagans* y los más bajos en *E. mackaiana* (Tabla IV.22). Para el K en hojas y tallos los valores más altos están en *E. australis* y *E. arborea*; los más bajos se encuentran en *E. tetralix* (hojas) y *E. erigena* (tallos). Esta última especie también destaca por presentar los valores más bajos de K en raíces. En cuanto a la raíz destacan la elevadas concentraciones en *E. tetralix* y *E. arborea*.

Tabla IV.22. Concentración de K (mg kg<sup>-1</sup>) en las especies de brezo

	N	K Flores	K Hojas	K Tallos	K Raíces
<i>C. vulgaris</i>	18	2878±1494	3652±773	2104±502	1665±360
<i>D. cantabrica</i>	5	---	2426±1007	3025±1724	1216±456
<i>E. cinerea</i>	18	2433±1744	3419±540	2475±617	958±541
<i>E. ciliaris</i>	7	---	2861±1597	2458±928	1153±550
<i>E. tetralix</i>	1	---	2104±130	1669±115	1922±105
<i>E. mackaiana</i>	7	1698±651	2953±439	2256±964	1202±319
<i>E. erigena</i>	2	---	3147±1776	1470±440	123±8
<i>E. scoparia</i>	2	---	3993±975	2386±361	936±133
<i>E. umbellata</i>	12	---	3351±1390	2309±965	1139±556
<i>E. vagans</i>	6	4190±1082	4230±555	1999±498	1163±252
<i>E. australis</i>	2	---	5203±1375	3171±1733	1184±776
<i>E. arborea</i>	1	---	4550±105	3722±97	1961±73

Al y Fe se caracterizan por presentar los valores más elevados en raíces, luego en hojas y los más bajos en tallos, excepto para *E. arborea*, *E. australis* y *D. cantabrica* (Tablas IV.23 y IV.24). En flores destacan las bajas concentraciones de Al y Fe en *E. mackaiana*.

Para el Al foliar destacan *E. australis* y *E. umbellata* por sus elevadas concentraciones y las más bajas en *E. erigena* y *E. scoparia*. En cuanto al Al en tallo *E. australis* destaca por presentar el valor más alto, mientras que los más bajos se localizan en *E. arborea* y *E. scoparia*. Las plantas de *E. tetralix* y *E. scoparia* sobresalen por sus elevados valores de Al en raíces, mientras que *E. arborea* presenta el valor medio más bajo en este órgano.

En cuanto al Fe cabe referir que *E. arborea* presenta las concentraciones más bajas en los tres compartimentos. *E. vagans* y *E. australis* presentan los valores de Fe foliar más altos de todas las especies. Los valores más altos de Fe en tallos se encuentran en *E. australis* y de Fe en raíces en las plantas de *E. erigena*.

Cabe destacar los casos de *E. erigena*, *E. tetralix* y *E. ciliaris* por los altos niveles de Fe en raíces, en comparación con las concentraciones de hojas y tallos. Esto podría deberse a una adaptación de estas especies propias de medios encharcados frente a los niveles elevados de Fe en forma reducida; este elemento quedaría bloqueado a nivel radicular limitando la planta su translocación al tejido aéreo.

Tabla IV.23. Concentración de Al (mg kg<sup>-1</sup>) en las especies de brezo

	N	Al Flores	Al Hojas	Al Tallos	Al Raíces
<i>C. vulgaris</i>	18	307±216	442±168	215±85	702±331
<i>D. cantabrica</i>	5	---	365±135	216±48	587±206
<i>E. cinerea</i>	18	339±291	406±248	261±146	772±727
<i>E. ciliaris</i>	7	---	352±261	138±60	546±493
<i>E. tetralix</i>	1	---	374±15	165±2	1395±24
<i>E. mackaiana</i>	7	206±99	301±140	193±103	571±352
<i>E. erigena</i>	2	---	174±56	168±147	530±315
<i>E. scoparia</i>	2	---	198±68	118±16	957±123
<i>E. umbellata</i>	12	---	460±258	219±125	788±590
<i>E. vagans</i>	6	360±208	360±269	148±44	481±207
<i>E. australis</i>	2	---	515±387	352±173	740±296
<i>E. arborea</i>	1	---	364±10	107±7	246±12

Tabla IV.24. Concentración de Fe (mg kg<sup>-1</sup>) en las especies de brezo

	N	Fe Flores	Fe Hojas	Fe Tallos	Fe Raíces
<i>C. vulgaris</i>	18	214±137	335±131	182±55	630±642
<i>D. cantabrica</i>	5	---	216±135	148±55	168±91
<i>E. cinerea</i>	18	296±259	286±210	210±254	365±465
<i>E. ciliaris</i>	7	---	207±205	87±96	845±1500
<i>E. tetralix</i>	1	---	328±16	208±10	4520±27
<i>E. mackaiana</i>	7	182±131	204±103	193±49	499±268
<i>E. erigena</i>	2	---	195±138	168±87	1991±2748
<i>E. scoparia</i>	2	---	248±133	139±41	881±30
<i>E. umbellata</i>	12	---	330±264	192±164	334.2±253
<i>E. vagans</i>	6	274±97	402±208	201±41	523±283
<i>E. australis</i>	2	---	415±179	563±697	522±328
<i>E. arborea</i>	1	---	82±3	35±2	61±5

## IV.4.3. CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA

En la Tabla IV.25 se muestran los valores de referencia de los algunos de los elementos traza analizados en planta, junto a los niveles en suelo, comunes y máximos, que resultan tolerables para las mismas.

Tabla IV.25. Niveles de referencia para suelo y planta

	Rango común en hojas (máximo)	Rango en hojas suficiente (excesivo)	Niveles en suelo tolerables para plantas
	(Melsted, 1973)	(Kabata-Pendias, 1994)	(Logan & Traina, 1993)
<b>Cu</b>	3-40 (150)	5-30 (20-100)	100
<b>Mn</b>	15-150 (300)	20-300 (300-500)	---
<b>Ni</b>	0.1-1 (3)	0.1-5 (10-100)	100
<b>Cr</b>	0.2-1.0	0.1-0.5 (5-30)	100
<b>Zn</b>	15-150 (300)	27-150 (100-400)	300
<b>Pb</b>	0.1-5 (10)	5-10 (30-300)	100

	Rango común en suelos	Rango normal en plantas (tóxico)	Coefficiente de transferencia (suelo-planta)
	[Beckett & Davis, 1977; Sauerbeck, 1985]		[ <sup>1</sup> Sauerbeck, 1985; <sup>2</sup> Alloway,
<b>Cu</b>	2-100	4-15 (>20)	0.1-1 <sup>1</sup> ; 0.1-10 <sup>2</sup>
<b>Mn</b>	100-4000	15-100	0.1-10 <sup>1,2</sup>
<b>Ni</b>	10-1000	1 (>20-30)	0.1-1 <sup>1,2</sup>
<b>Cr</b>	40-200	(>150)	0.01-0.1 <sup>2</sup>
<b>Zn</b>	10-300	15-200 (>200)	1-10 <sup>1,2</sup>
<b>Pb</b>	2-200	0.1-10 (>10-20)	0.01-0.1 <sup>1,2</sup>

Concentraciones expresadas en mg kg<sup>-1</sup> referidas a peso seco.

En las tablas que siguen a continuación se recogen los contenidos de metales pesados en las especies de brezo estudiadas en Galicia. De forma similar a lo observado para el Fe y el Al, el Cu se acumula preferentemente en las raíces de las plantas de brezo y el segundo compartimento con mayor contenido medio es, a partes iguales, hoja o tallo (Tabla IV.26).

En cuanto al Cu en flores las mayores concentraciones están en *E. cinerea* y *C. vulgaris* y las más baja en *E. vagans*. Para hojas destaca *E. australis* por sus altos valores y en tallos *E. tetralix* y *E. mackaiana*. En tallos y raíces destaca *E. australis* por la gran variabilidad en sus concentraciones, hecho atribuible a que se ha caracterizado esta planta en dos poblaciones muy diferentes, una situada en la mina de Touro (con concentraciones de 20.3, 41 y 60 mg kg<sup>-1</sup> en hoja, tallo y raíz, respectivamente). y otra sobre los gabros de Monte Castelo (con concentraciones de 3.7, 5.9 y 6.8 mg kg<sup>-1</sup> en hoja, tallo y raíz, respectivamente).

En general, la toxicidad por este metal tiene lugar cuando la concentración de Cu en los tejidos excede de 20-30 mg.kg<sup>-1</sup> (Beckett & Davis, 1977; Sauerbeck, 1985; Kabata-Pendias & Pendias, 1994), concentración que se supera en *E. australis* de la mina de Touro.

Tabla IV.26 Concentración de Cu (mg kg<sup>-1</sup>) en las especies de brezo

	N	Cu Flores	Cu Hojas	Cu Tallos	Cu Raíces
<i>C. vulgaris</i>	18	9.8±6.4	8.4±4.4	6.3±1.3	16.5±18.0
<i>D. cantabrica</i>	5	---	6.5±3.0	9.1±3.0	5.6±0.9
<i>E. cinerea</i>	18	10.9±9.5	9.4±15.4	7.7±4.1	10.6±13.7
<i>E. ciliaris</i>	7	---	7.4±2.3	8.1±1.8	11.0±9.8
<i>E. tetralix</i>	1	---	4.5±0.5	10.7±0.7	21.9±0.7
<i>E. mackaiana</i>	7	7.8±6.2	10.6±10.9	11.4±4.9	8.5±2.0
<i>E. erigena</i>	2	---	3.7±0.6	5.2±1.8	6.1±6.2
<i>E. scoparia</i>	2	---	4.1±2.8	4.8±0.4	5.5±0.8
<i>E. umbellata</i>	12	---	8.9±4.9	9.0±6.1	12.3±13.4
<i>E. vagans</i>	6	6.0±2.6	6.3±2.1	6.6±2.8	7.1±5.3
<i>E. australis</i>	2	---	12.0±11.7	23.5±24.8	33.4±37.6
<i>E. arborea</i>	1	---	8.7±0.5	6.3±0.5	9.9±0.4

El Mn, Ni, Cr, Zn y Pb no presentan un patrón de distribución entre órganos, tan evidente como los elementos anteriormente considerados.

En cuanto al Mn en flores las mayores concentraciones están en *E. cinerea* y las más bajas en *E. vagans* (Tabla IV.27). Para hojas, tallos y raíces destaca *E. tetralix* por sus altos contenidos en este elemento. Los contenidos en hoja más bajos están en *E. erigena* y *E. scoparia*; en tallos, en *D. cantabrica* y *E. scoparia*; y en raíces, en *E. arborea*.

La sensibilidad al Mn varía considerablemente entre especies y se ha establecido un umbral de 300 mg.kg<sup>-1</sup> en tejido seco a partir del cual algunas especies muestran evidencias de toxicidad (Kabata-Pendias, 1994). En las plantas estudiadas los niveles de este elemento son bastante más elevados en al menos uno de los compartimentos analizados y sólo los contenidos medios de *E. arborea* y *D. cantabrica* se mantienen por debajo de ese umbral.

Tabla IV.27. Concentración de Mn (mg kg<sup>-1</sup>) en las especies de brezo

	N	Mn Flores	Mn Hojas	Mn Tallos	Mn Raíces
<i>C. vulgaris</i>	18	216±201	614±494	426±193	419±221
<i>D. cantabrica</i>	5	---	246±122	126±48	181±197
<i>E. cinerea</i>	18	295±210	383±302	342±226	303±192
<i>E. ciliaris</i>	7	---	451±296	287±177	532±314
<i>E. tetralix</i>	1	---	922±80	1084±77	1043±65
<i>E. mackaiana</i>	7	184±175	321±164	391±279	382±286
<i>E. erigena</i>	2	---	97±12	353±36	486±176
<i>E. scoparia</i>	2	---	96±1	131±19	537±313
<i>E. umbellata</i>	12	---	296±269	414±36	505±254
<i>E. vagans</i>	6	62±39	136±111	176±196	389±255
<i>E. australis</i>	2	---	527±315	1179±202	1147±78
<i>E. arborea</i>	1	---	186±12	255±13	126±9

Destacan los valores bajos de Ni en flores para *E. mackaiana* (Tabla IV.28). En los otros órganos destacan *E. scoparia* y *E. vagans* por sus valores medios más elevados, en consonancia con la naturaleza de los suelos serpentínicos de los que proceden. *C. vulgaris* y *E. cinerea* también presentan valores medios altos, pero con una gran variabilidad entre plantas de distintas procedencias. Los niveles más bajos se encuentran en *E. erigena* (hojas y raíces) y *E. tetralix* (tallos).

Concentraciones de Ni por encima de 100 mg.kg<sup>-1</sup> en tejido seco se consideran críticos (István y Benton, 2000), valores que no se superan en ninguno de los casos. Por encima de 10 mg.kg<sup>-1</sup> se consideran excesivos (Kabata-Pendias y Pendias, 1994) y en este grupo estarían las ya mencionadas *E. vagans*, *E. scoparia*, *C. vulgaris* y *E. cinerea*, junto con las raíces de *E. mackaiana*, *E. umbellata* y *E. arborea*.

En general la concentración más alta de Ni se encuentra en la raíz, especialmente donde los niveles de este elemento en suelo son más elevados.



Tabla IV.28. Concentración de Ni ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en las especies de brezo

	N	Ni Flores	Ni Hojas	Ni Tallos	Ni Raíces
<i>C. vulgaris</i>	18	20.6±25.7	15.3±17.7	13.0±14.5	24.3±39.8
<i>D. cantabrica</i>	5	---	2.4±1.5	2.3±1.6	1.6±0.9
<i>E. cinerea</i>	18	20.7±18.1	11.9±15.2	11.2±16.4	14.6±17.8
<i>E. ciliaris</i>	7	---	3.1±1.3	3.3±1.9	3.2±1.8
<i>E. tetralix</i>	1	---	4.7±0.7	1.6±0.5	7.8±0.8
<i>E. mackaiana</i>	7	2.3±1.7	8.5±6.5	7.7±5.7	14.7±20.1
<i>E. erigena</i>	2	---	1.4±0.2	3.6±1.5	1.3±0.4
<i>E. scoparia</i>	2	---	20.7±1.1	23.8±1.6	122.3±32.2
<i>E. umbellata</i>	12	---	8.9±11.0	8.1±8.6	13.1±30.2
<i>E. vagans</i>	6	16.8±8.3	16.3±9.5	16.9±13.7	33.4±23.5
<i>E. australis</i>	2	---	3.9±3.3	6.2±4.4	4.4±2.6
<i>E. arborea</i>	1	---	8.0±0.7	6.0±1.2	10.6±0.3

En cuanto al Cr cabe destacar los valores inferiores a  $1 \text{ mg kg}^{-1}$ , que es el límite de detección instrumental, en *D. cantabrica*, *E. tetralix* y *E. arborea*, así como en los tallos de *E. australis* (Tabla IV.29). También cabe destacar los bajos valores medios *E. ciliaris*, mientras que las plantas procedentes de suelos sobre serpentinitas, *E. vagans* y *E. scoparia*, presentan los valores medios más elevados en todos los compartimentos estudiados (por encima de  $8 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Junto a éstas, *C. vulgaris*, *E. cinerea* y *E. mackaiana* presentan valores medios que se incluyen dentro del rango de concentraciones  $5\text{-}30 \text{ mg kg}^{-1}$ , considerado excesivo por Kabata-Pendias (1994). Cabe destacar el valor medio de Cr en las raíces de *E. scoparia* que alcanza los  $45 \text{ mg kg}^{-1}$ .

Tabla IV.29. Concentración de Cr ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en las especies de brezo

	N	Cr Flores	Cr Hojas	Cr Tallos	Cr Raíces
<i>C. vulgaris</i>	18	4.4±3.9	9.7±14.4	5.1±6.7	9.1±11.0
<i>D. cantabrica</i>	5	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
<i>E. cinerea</i>	18	6.1±7.0	6.5±17.0	4.8±12.4	4.7±11.2
<i>E. ciliaris</i>	7	---	1.1±0.3	1.1±0.2	1.3±0.9
<i>E. tetralix</i>	1	---	<1.0	<1.0	<1.0
<i>E. mackaiana</i>	7	2.5±2.4	5.4±6.0	3.9±4.9	9.6±14.2
<i>E. erigena</i>	2	---	1.8±1.1	1.6±0.8	2.0±1.4
<i>E. scoparia</i>	2	---	12.7±10.4	8.4±5.2	45.5±24.7
<i>E. umbellata</i>	12	---	2.0±2.3	1.7±1.3	1.4±1.0
<i>E. vagans</i>	6	14±10.1	12.1±9.6	11.5±4.3	19.9±14.1
<i>E. australis</i>	2	---	3.9±1.0	<1.0	1.7±0.9
<i>E. arborea</i>	1	---	<1.0	<1.0	<1.0

N= nº de plantas analizadas en cada especie

Los valores medios de Zn en flor son muy similares en las cuatro especies estudiadas (Tabla IV.30). En cuanto a las concentraciones foliares destacan los valores medios más elevados de *E. tetralix* y de *E. mackaiana* y el más bajo en *E. vagans*. En los tallos cabe señalar los contenidos más elevados en *D. cantabrica* y *E. mackaiana* y los más bajos en *E. arborea* y *E. scoparia*. En lo que respecta a la concentración de Zn en raíces destaca por encima de los demás el valor medio de *E. arborea*, muy superior a los de *E. mackaiana* y *C. vulgaris*; sin embargo las demás especies presentan valores considerablemente más bajos (entre 10 y 20 mg kg<sup>-1</sup>).

En la bibliografía consultada un rango entre 20 y 100 mg.kg-1 en tejido seco se considera suficiente, mientras que por encima de 200 mg kg-1 se superarían los niveles fitotóxicos (Melsted, 1973; Beckett y Davis, 1977; Kabata-Pendias y Pendias, 1994). En consecuencia, las concentraciones en todas las plantas están por debajo de los valores considerados fitotóxicos para este metal.

Tabla IV.30 Concentración de Zn (mg kg<sup>-1</sup>) en las especies de brezo

	N	Zn Flores	Zn Hojas	Zn Tallos	Zn Raíces
<i>C. vulgaris</i>	18	11.3±4.9	20.6±11.2	12.6±5.5	22.0±18.6
<i>D. cantabrica</i>	5	---	14.5±6.2	23.1±18.7	10.4±3.8
<i>E. cinerea</i>	18	12.0±5.8	16.7±5.1	12.6±5.5	12.5±10.6
<i>E. ciliaris</i>	7	---	16.9±7.4	11.6±2.9	16.1±6.2
<i>E. tetralix</i>	1	---	32.4±1.5	15.8±1.2	16.2±1.0
<i>E. mackaiana</i>	7	11.1±10.1	22.6±7.4	18.8±5.5	25.9±13.5
<i>E. erigena</i>	2	---	15.8±6.9	16.2±5.7	16.7±7.0
<i>E. scoparia</i>	2	---	12.3±1.1	9.1±4.1	10.5±2.2
<i>E. umbellata</i>	12	---	19.4±14.7	12.1±4.0	12.0±5.5
<i>E. vagans</i>	6	14.4±6.1	9.4±4.0	12.9±4.1	13.3±8.2
<i>E. australis</i>	2	---	13.3±0.4	11.4±1.7	11.7±4.1
<i>E. arborea</i>	1	---	18.8±4.3	7.8±1.5	55.8±2.5

No se aprecian diferencias importantes entre los contenidos de Pb en flores, que están en torno a 1 mg kg-1 (Tabla IV.31). Dos especies destacan por sus concentraciones de Pb en los otros órganos. Se trata de *E. erigena*, que presenta los mayores valores en hoja y tallo, y *E. mackaiana* con valores máximos en tallos y raíces.

Para el Pb concentraciones superiores a 10-20 mg kg-1 en hoja se consideran excesivas y por encima de 30 mg kg-1 se supera el nivel de fitotoxicidad (Beckett y Davis, 1977; Sauerbeck, 1985; Kabata-Pendias y Pendias, 1994), aunque la tolerancia a este metal depende mucho del tipo de planta. Los contenidos en todos los casos estudiados están muy por debajo de estos umbrales.

Tabla IV.31 Concentración de Pb (mg kg<sup>-1</sup>) en las especies de brezo

	N	Pb Flores	Pb Hojas	Pb Tallos	Pb Raíces
<i>C. vulgaris</i>	18	0.9±0.3	1.1±0.6	1.2±0.8	2.0±2.1
<i>D. cantabrica</i>	5	---	1.0±0.2	0.8±0.5	0.8±0.4
<i>E. cinerea</i>	18	0.9±0.7	0.8±0.4	1.2±0.8	1.5±1.6
<i>E. ciliaris</i>	7	---	1.0±0.3	1.8±1.1	1.7±1.3
<i>E. tetralix</i>	1	---	1.3±0.3	1.9±0.2	0.7±0.2
<i>E. mackaiana</i>	7	1.0±0.9	1.2±0.5	2.0±1.0	4.3±2.7
<i>E. erigena</i>	2	---	2.3±1.6	2.4±0.1	---
<i>E. scoparia</i>	2	---	0.9±0.8	1.4±1.6	1.7±1.3
<i>E. umbellata</i>	12	---	1.1±0.6	1.3±1.1	1.5±1.9
<i>E. vagans</i>	6	1.2±0.7	1.1±0.5	1.4±1.1	1.9±2.3
<i>E. australis</i>	2	---	0.7±0.6	1.2±0.9	0.7±0.4
<i>E. arborea</i>	1	---	0.9±0.1	0.7±0.2	0.8±0.1

A modo de síntesis cuando se considera la composición elemental de las hojas de cada especie, sobresalen *E. australis* y *E. erigena* por sus valores extremos. Así, *E. australis* presenta valores muy altos de Fe, Cu y Mn (propios de rocas básicas) y de K, Al y P; también presenta niveles muy bajos de Ca y Mg, lo que podría estar en aparente contradicción con lo anteriormente expuesto y que se explica por la procedencia de esta planta (mina de Touro). Por su parte *E. erigena* destaca por sus muy elevados contenidos foliares de Ca y Na, en concordancia por la influencia marina de las muestras procedentes de Camariñas. También destaca en Pb y Mg, siendo inferiores los niveles de Al, Fe, Ni y Mn.

*D. cantabrica* destaca por sus contenidos foliares relativamente elevados en P, Ca y Mg, lo que cuestiona la frugalidad de esta especie. Por el contrario la especie de brezo más pobre en estos elementos resulta ser *E. mackaiana*.

*E. scoparia* y *E. vagans* muestran contenidos elevados de Ni y Cr en consonancia con los suelos serpentínicos de los que proceden.

#### IV.4.4. MATRICES DE CORRELACIÓN EN PLANTA

Se han realizado análisis de correlación entre las concentraciones de elementos de cada compartimento vegetal (flor, hoja, tallo y raíz), encontrándose que había correlaciones significativas y que en muchos casos coincidían en al menos dos compartimentos (Tabla IV.32), como por ejemplo K-Mg, Fe-Ca, Na-C, Al-N. Ejemplos de correlaciones en tres compartimentos son Mg-Ca, Cr y Ni; Mn-Cu. En el caso de Fe y Al, las correlaciones son muy significativas en los 4 órganos.

Tabla IV.32 Matriz de correlaciones significativas ( $p < 0.05$ ) entre elementos químicos de cada compartimento vegetal analizado (flor, hoja, tallo y raíz)

	N	P	Ca	Mg	Na	K	Al	Fe	Cu	Mn	Ni	Cr	Zn	Pb
C	X	X			X	X				X	X			X
N		X	X		X		X						X	X
P				X	X	X	X			X	X	X		X
Ca				X	X	X	X	X	X		X		X	
Mg					X	X	X				X	X	X	
Na						X		X	X					
K									X	X			X	
Al								X		X				
Fe										X		X		
Cu										X			X	
Mn													X	
Ni												X		
Cr														
Zn														X

En negrita y cursiva se señalan las correlaciones muy significativas ( $p < 0.01$ ). Se señalan las correlaciones entre elementos químicos del mismo órgano si implican a un órgano (amarillo), dos órganos (naranja), tres (rojo) y cuatro (violeta).

A partir de esta información se podría deducir que es indiferente continuar el estudio con cualquiera de los órganos vegetales considerados. Sin embargo, hemos visto que las concentraciones difieren según los órganos, en función del elemento de que se trate. Por otro lado, la bibliografía especializada difiere en el órgano vegetal preferente de estudio (hoja, tallo, brotes anuales, etc.) aún en trabajos de índole similar o con las mismas especies. Por ejemplo Mars y Bannister (1978) muestrean los tallos mientras Hernández *et al.* (2002) recogen los brotes anuales. El presente estudio ha seguido los protocolos de muestreo ya establecidos en la bibliografía y vistos los resultados obtenidos hasta el momento, ha parecido más oportuno calcular la concentración de cada elemento en la planta como el promedio de los valores correspondientes a hoja, tallo y raíz. En la Tabla IV.33 se recogen los valores medios de cada especie de brezo.

*E. tetralix* presenta valores medios elevados para C, Ca, Al, Fe, Cu, Mn y Zn, y muy bajos en N, K y Cr. Inversamente *E. arborea* destaca por presentar los valores más bajos para Mg, Na, Al, Fe, Mn, Cr y Pb, mientras muestra valores relativamente elevados de Pb y Zn. Debe tenerse en cuenta que estas dos especies se han muestreado en una localización, *E. tetralix* en los gabros de Monte Castelo y *E. arborea* en las cuarcitas del Xistral.

Los brezos de rocas ultrabásicas (*E. scoparia* y *E. vagans*) presentan los valores medios más elevados para Mg, Ni y Cr, y en el caso de *E. vagans* de N.

El brezo *E. erigena* presenta valores altos de Ca y Na (reflejando de nuevo la influencia marina en las muestras) y sus bajos contenidos en Ni y Cr la diferencian claramente de las especies de suelos serpentínicos.

*E. umbellata* y *E. mackaiana* destacan por sus bajos valores de Ca y Mg en comparación con el resto de las especies. *E. mackaiana* (junto con *E. vagans*) presenta las concentraciones más altas de N y las más bajas de P. En el caso de *E. mackaiana* la relación entre estos nutrientes está en concordancia con los contenidos totales de estos elementos en el suelo, destacando los elevados niveles de Pb y Zn como marcadores de contaminación atmosférica en las turberas.

En cuanto a los brezos más ubicuistas cabría destacar en primer lugar a *D. cantabrica* que ya sobresalía por sus altos contenidos foliares de P, Ca y Mg; en relación con el promedio en planta sigue destacando por su valor alto de P y sus bajos niveles de Mn, Ni, Fe y Pb. *E. australis* muestra contenidos medios elevados de N, K, Al, Cu y Mn, resultando más pobre en Mg, Na, Zn y Pb. Los restantes brezos: *C. vulgaris*, *E. ciliaris* y *E. cinerea*, presentan valores intermedios de composición elemental entre los extremos ya referidos.

Tabla IV.33. Análisis elemental en las especies de brezo promediando los contenidos en hoja, tallo y raíz

	N	%C Planta	%N Planta	%P Planta
<i>C. vulgaris</i>	18	47.49±1.40	0.82±0.14	1457±290
<i>D. cantabrica</i>	5	49.46±1.43	0.82±0.10	2045±116
<i>E. cinerea</i>	18	47.97±1.84	0.70±0.05	1567±402
<i>E. ciliaris</i>	7	49.12±1.42	0.77±0.10	1555±320
<i>E. tetralix</i>	1	50.09±3.24	0.66±0.23	1679±261
<i>E. mackaiana</i>	7	48.89±0.70	1.01±0.10	1167±257
<i>E. erigena</i>	2	48.96±2.73	0.70±0.03	1345±593
<i>E. scoparia</i>	2	47.97±0.59	0.79±0.01	1389±7.77
<i>E. umbellata</i>	12	48.28±1.26	0.73±0.08	1583±488
<i>E. vagans</i>	6	49.30±0.48	0.94±0.06	1193±385
<i>E. australis</i>	2	50.85±0.01	0.66±0.02	1789±199
<i>E. arborea</i>	1	47.70±4.22	0.83±0.34	2426±147

	N	%Ca Planta	%Mg Planta	%Na Planta	%K Planta	%Al Planta	%Fe Planta
<i>C. vulgaris</i>	18	1989±421	1037±409	720±162	2307±425	453±142	382±244
<i>D. cantabrica</i>	5	2304±446	1315±196	656±165	2559±900	389±110	177±75
<i>E. cinerea</i>	18	2324±251	1289±423	1063±384	2284±293	479±353	287±282
<i>E. ciliaris</i>	7	2039±635	1089±217	864±218	2157±753	345±245	379±588
<i>E. tetralix</i>	1	3372±2142	1301±866	869±423	1894±218	645±658	1685±2455
<i>E. mackaiana</i>	7	1773±363	993±360	868±132	2136±452	354±179	298±99
<i>E. erigena</i>	2	3810±1071	1346±168	1834±1091	1913±447	290±135	785±899
<i>E. scoparia</i>	2	2113±594	1581±356	794±270	2438±401	424±68	423±67
<i>E. umbellata</i>	12	1787±564	974±199	595±137	2266±675	489±271	285±209
<i>E. vagans</i>	6	2112±466	1497±325	761±170	2689±732	312±121	369±137
<i>E. australis</i>	2	2224±900	809±287	528±157	3186±1294	536±285	500±401
<i>E. arborea</i>	1	1846±995	952±628	599±379	3411±1522	239±129	60±24

	N	%Cu Planta	%Mn Planta	%Ni Planta	%Cr Planta	%Zn Planta	%Pb Planta
<i>C. vulgaris</i>	18	10.4±7.2	486.6±258.3	17.5±23.1	8.0±10.3	18.4±8.4	1.3±0.9
<i>D. cantabrica</i>	5	7.1±1.5	184.6±76.9	2.1±0.5	---	16.0±7.1	0.8±0.2
<i>E. cinerea</i>	18	9.2±10.8	342.7±207.1	12.6±15.8	5.3±13.4	13.9±4.9	1.1±0.6
<i>E. ciliaris</i>	7	8.9±3.9	423.3±221.9	3.2±1.0	1.7±0.4	14.8±4.4	1.5±0.7
<i>E. tetralix</i>	1	12.4±8.8	1017±84	4.6±3.1	1.0±0	21.5±9.5	1.3±0.9
<i>E. mackaiana</i>	7	10.2±4.8	364.3±153.8	10.3±9.0	6.3±8.2	22.4±7.7	2.5±1.3
<i>E. erigena</i>	2	5.0±2.8	311.7±74.3	2.1±0.7	1.8±1.1	16.2±6.5	1.9±0.4
<i>E. scoparia</i>	2	4.7±1.3	255.2±98.2	55.6±11.7	22.2±13.4	10.6±1.6	1.3±1.2
<i>E. umbellata</i>	12	10.1±7.7	405.1±252.5	10.0±15.4	1.7±1.4	14.5±6.4	1.2±0.8
<i>E. vagans</i>	6	6.4±2.4	266.6±165.4	21.2±12.7	14.7±8.6	12.2±3.8	1.4±1.1
<i>E. australis</i>	2	23±25	951.2±146.1	4.8±3.4	2.2±1.6	12.1±2.0	0.8±0.6
<i>E. arborea</i>	1	8.3±1.8	189.2±64.5	8.2±1.8	1.0±0	27.5±25.1	0.8±0.1

Se han calculado los coeficientes de correlación de Pearson entre valores medios de elementos en planta (Tabla IV.34). Los elementos biófilos P y C están correlacionados muy significativamente ( $p<0.01$ ) entre sí. El N está correlacionado negativamente con el Ca, Al y Mn, y de forma positiva con el Zn y el Pb. También se han encontrado correlaciones significativas entre algunos elementos mayoritarios, destacando Ca con Mg, Na y K; también entre Al-P y Al-Fe.

En cuanto a los elementos traza el Mn muestra correlaciones positivas con Al, Fe y Cu. Por otro destacan también las correlaciones de Cr con Ni y Mg. El Pb se correlaciona positivamente con el N y el Zn, y negativamente con el P.

Reiterando los resultados obtenidos a partir de las correlaciones entre composición elemental de los cuatro órganos vegetales estudiados, las correlaciones más elevadas entre valores promedio de planta (Tabla IV.35) se refieren a los elementos más abundantes en las rocas ultrabásicas: Ni y Cr (0.7), Mg y Cr (0.66), Mg y Ni (0.52); en rocas básicas y ultrabásicas Ca y Mg (0.42), Fe y Al (0.54), Fe y Mn (0.42). Por otro lado, también se encuentran correlaciones de interés entre Zn y Pb (0.54); y entre C y P (0.37).

Tabla IV.34 Matriz de correlaciones entre las concentraciones elementales en planta (promedio de hoja, tallo y raíz)

	N	P	Ca	Mg	Na	K	Al	Fe	Cu	Mn	Ni	Cr	Zn	Pb
Nº	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79
C		<b>0,37</b>									-0,27			
N			-0,25				<b>-0,30</b>			-0,27			<b>0,38</b>	<b>0,42</b>
P							0,25			0,23	-0,29	-0,29		<b>-0,49</b>
Ca				<b>0,42</b>	0,29	0,22								
Mg										-0,24	<b>0,52</b>	<b>0,66</b>		
Na									-0,29					
K									0,28					
Al								<b>0,54</b>		<b>0,33</b>				
Fe										<b>0,42</b>			0,23	
Cu										<b>0,42</b>				-0,22
Mn														
Ni												<b>0,70</b>		
Cr														
Zn														<b>0,54</b>

En negrita y cursiva se señalan las correlaciones muy significativas ( $p<0.01$ ). Se señala en amarillo si tiene lugar en dos órganos, en naranja en tres y en violeta en los 4 para los dos elementos químicos enfrentados.

## IV.4.5. ANÁLISIS ELEMENTAL POR MATERIAL DE PARTIDA DE SUELO

En lo que se refiere a los elementos biófilos, las plantas que crecen sobre los sedimentos cuaternarios costeros destacan por los valores más bajos de %C, %N y (junto con los brezos de las pizarras) %P (Tabla IV.35). Las concentraciones más elevadas de %C se encuentran en las plantas que crecen en suelos desarrollados sobre sedimentos orgánicos, esquistos, granitos y cuarcitas. En cuanto al Nitrógeno destacan las elevadas concentraciones en los brezos de las turberas.

Tabla IV.35. Concentración de C, N y P [%] en las especies de brezo

	N	%C	%N	%P
<b>A</b>	7	(47.35±2.08)	(0.73±0.07)	(1683±284)
<b>B</b>	15	(48.27±1.69)	(0.74±0.11)	(1607±33)
<b>Es</b>	4	(49.55±0.36)	(0.76±0.10)	(1889±203)
<b>Gr</b>	13	(49.62±0.56)	(0.78±0.11)	(1955±290)
<b>P</b>	6	(48.28±1.43)	(0.84±0.11)	(1007±102)
<b>Q</b>	11	(48.85±0.91)	(0.83±0.11)	(1598±461)
<b>SO</b>	2	(49.28±0.76)	(1.14±0.05)	(1305±69)
<b>SQ</b>	5	(46.20±0.88)	(0.66±0.03)	(1077±102)
<b>UB</b>	18	(48.04±1.33)	(0.83±0.14)	(1254±265)
<b>Todas</b>	81	(48.40±1.52)	(0.79±0.13)	(1519±406)

N= nº de plantas analizadas en suelos desarrollados sobre diferentes materiales de partida.

(A: Anfibolitas de Touro, B: Rocas básicas, Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarcitas, SO: Sedimentos orgánicos, SQ: Sedimentos cuaternarios costeros y UB: Rocas ultrabásicas).

Las plantas recogidas sobre los sedimentos cuaternarios costeros también destacan por sus concentraciones medias más altas en Ca y Na (Tabla IV.36), en concordancia con la abundancia de estos elementos en su hábitat (Ca, de las conchas presentes en los sedimentos y el Na de los aerosoles marinos). Los brezos de rocas ultrabásicas y esquistos presentan niveles muy elevados de Mg y K, respectivamente, mientras que los brezos sobre granitos destacan por sus mayores concentraciones de Al. Los brezos procedentes de los gabros de Monte Castelo presentan niveles de Fe que al menos duplican los de las plantas procedentes de otras rocas básicas y ultrabásicas, de acuerdo con los contenidos de Fe total en los respectivos suelos.

Los brezos de las turberas muestran bajas concentraciones en prácticamente todos estos elementos y también destacan el bajo nivel Fe en las muestras de cuarcitas (podsolización) y de Mg y P en las plantas procedentes de las pizarras

Tabla IV.36. Concentración de Ca, Mg, Na, K, Al y Fe (mg kg<sup>-1</sup>) en las especies de brezo

	N	Ca	Mg	Na	K	Al	Fe
<b>A</b>	7	(2127±395)	(1011±171)	(668±379)	(2826±699)	(389±74)	(367±137)
<b>B</b>	15	(2021±638)	(984±289)	(796±230)	(2110±445)	(636±353)	(744±552)
<b>Es</b>	4	(2368±398)	(1306±258)	(733±41)	(3075±624)	(552±171)	(281±121)
<b>Gr</b>	13	(2046±418)	(1169±274)	(906±389)	(2039±305)	(1955±290)	(211±93)
<b>P</b>	6	(1598±482)	(739±174)	(792±174)	(2291±524)	(426±163)	(216±63)
<b>Q</b>	11	(2280±425)	(1073±168)	(738±265)	(2571±542)	(273±141)	(102±63)
<b>SO</b>	2	(1428±197)	(766±14)	(879±47)	(1687±83)	(140±40)	(141±3)
<b>SQ</b>	5	(2658±1239)	(991±240)	(1411±771)	(2367±572)	(300±101)	(158±48)
<b>UB</b>	18	(2190±390)	(1583±378)	(778±190)	(2320±599)	(390±215)	(411±148)
<b>Todas</b>	81	(2117±568)	(1154±372)	(827±343)	(2336±580)	(429±237)	(352±330)

N= nº de plantas analizadas en suelos desarrollados sobre diferentes materiales (A: Anfíbolitas de Touro, B: Rocas básicas, Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarzitas, SO: S. orgánicos, SQ: S. cuaternarios costeros y UB: Rocas ultrabásicas).

Las plantas de brezos recogidas en los suelos de anfíbolitas destacan por sus concentraciones de Cu, que resultan ser muy elevadas en comparación con las demás procedencias (Tabla IV.37), y de Mn (junto con las plantas de rocas básicas). Sin embargo presentan concentraciones de Pb muy bajas. En los suelos desarrollados sobre rocas ultrabásicas sobresalen las elevadas concentraciones de Ni y Cr en planta. Estos resultados son acordes con la mineralogía de los suelos que sustentan dicha vegetación.

Los brezos de las turberas muestran los valores medios más bajos para todos los elementos excepto en Zn y Pb; estos dos presentan sus máximas concentraciones en estas plantas y constituyen marcadores de contaminación atmosférica (Martínez Cortizas, 1997; Pontevedra, 2002), concretamente el Zn es marcador de la central térmica de As Pontes (Martínez Cortizas, 1997).

Tabla IV.37. Concentración de Cu, Ni, Cr, Mn, Zn y Pb (mg kg<sup>-1</sup>) en las especies de brezo

	N	Cu	Ni	Cr	Mn	Zn	Pb
<b>A</b>	7	(28.2±14.7)	(6.5±1.9)	(3.2±1.6)	(796.7±227.1)	(13.0±4.2)	(0.3±0.1)
<b>B</b>	15	(8.4±3.1)	(7.9±5.4)	(2.4±3.3)	(605.7±230.0)	(15.7±5.3)	(1.4±0.4)
<b>Es</b>	4	(12.1±10.7)	(2.2±1.0)	(1.0±0.0)	(417.2±184.3)	(11.2±2.8)	(0.7±0.1)
<b>Gr</b>	13	(6.2±1.3)	(2.3±1.1)	(1.0±0.0)	(250.2±187.4)	(16.0±9.0)	(1.0±0.9)
<b>P</b>	6	(10.0±5.7)	(5.3±2.5)	(1.3±0.7)	(185.0±142.2)	(16.4±2.6)	(2.4±0.6)
<b>Q</b>	11	(8.3±1.8)	(10.4±15.2)	(1.5±1.2)	(302.8±140.6)	(21.1±8.1)	(2.0±1.0)
<b>SO</b>	2	(8.2±0.9)	(3.3±0.4)	(2.2±1.7)	(295.8±92.6)	(27.1±7.4)	(3.2±0.8)
<b>SQ</b>	5	(4.8±1.5)	(2.8±1.3)	(2.3±0.5)	(332.2±70.9)	(11.8±1.4)	(1.4±0.6)
<b>UB</b>	18	(6.9±2.3)	(36.8±20.1)	(19.1±13.5)	(321.7±147.6)	(15.3±6.4)	(1.4±0.9)
<b>Todas</b>	81	(9.5±7.9)	(12.7±17.2)	(2±2.2)	(395.9±245.8)	(16.0±6.8)	(1.4±0.9)

N= nº de plantas analizadas en suelos desarrollados sobre diferentes materiales. (A: Anfíbolitas de Touro, B: Rocas básicas, Es: Esquistos, Gr: Granitos, P: Pizarras, Q: Cuarzitas, SO: S. orgánicos, SQ: S. cuaternarios costeros y UB: Rocas ultrabásicas).



Las plantas que crecen en suelos ácidos presentan valores muy bajos de Cu, Ni y Zn (sedimentos cuaternarios) o de Ni, Zn y de Cr (esquistos y granitos).

## IV.5. RELACIONES SUELO – PLANTA

### IV.5.1. MATRICES DE CORRELACIÓN SUELO – PLANTA

Se han elaborado matrices de correlación entre las propiedades individuales de los suelos y la composición elemental de las plantas. En la Tabla IV.38 aparecen las correlaciones significativas para las variables estudiadas ( $p < 0.05$ ), señalándose en negrita si éstas son muy significativas ( $p < 0.01$ ). El código de colores es el mismo que se utilizó en la gráfica de la varianza común de componentes principales del suelo: factor reactividad de suelo (azul), factor composición mineralógica (rojo), factor contenido de materia orgánica (amarillo) y factor existencia de propiedades ándicas (verde). Como cabría esperar las propiedades que estaban fuertemente asociadas a un componente principal covarían entre sí.

En esta matriz lo primero que llama la atención son las elevadas correlaciones entre los contenidos elementales en planta y las concentraciones totales en suelo. Así para los principales limitantes para el crecimiento vegetal, N y P, las correlaciones suelo-planta son muy significativas y destaca la correlación negativa entre las formas de fósforo asimilable y los contenidos de fósforo en planta. Otras correlaciones muy significativas de esta índole son las que mantienen el Mg y los metales: Al, Fe, Mn, Cu, Ni y Cr.

El P en planta presenta correlaciones negativas con cada uno de los cuatro cationes de cambio, con la suma de bases y la CICE y correlaciones positivas con el Al de cambio y el Al total del suelo. Esto indica que los niveles de P en planta están favorecidos en los suelos dominados por la química del Al y también explica de manera indirecta las correlaciones negativas encontradas con el P asimilable (mayor en rocas ácidas), Ni y Cr totales (propios de rocas ultrabásicas). Ahondando en la misma idea el Al de cambio mantiene correlaciones negativas con el Mg, Fe, Ni y Cr en planta; y el P total del suelo presenta correlaciones negativas con los contenidos de Ni, Cr, Zn y Pb, y una correlación positiva con el Al en planta.

El contenido de Mg en planta es el elemento que mantiene un mayor número de correlaciones significativas con Ca y Mg de cambio y totales en el suelo, así como con la suma de bases y la capacidad de intercambio catiónico. A su vez, estas últimas presentan elevadas correlaciones con Ni y Cr, reflejando de nuevo la geoquímica de las rocas ultrabásicas.

Se encuentran elevadas correlaciones entre el C en suelo y el porcentaje de N en planta. También se aprecia que los elementos con una gran afinidad por la fracción orgánica del suelo muestran correlaciones significativas con los elementos biófilos de la planta. Este hecho se evidencia mediante las correlaciones positivas entre el C en planta y el Pb del suelo; entre el N en planta y las bases de cambio, la suma de bases y la capacidad de intercambio catiónico y negativa con el Al total del suelo.

Tabla IV.38. Matriz de correlaciones de Pearson suelo-planta

	C	N	Pol	P	Cae	Ca	Mge	Mg	Ke	K	Nae	SB	ClCe
N	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79
C <sub>p</sub>			0,26	<b>0,36</b>						0,25			
N <sub>p</sub>	<b>0,57</b>	<b>0,53</b>	0,27	-0,24	0,29		0,22		<b>0,40</b>		<b>0,36</b>	0,28	<b>0,40</b>
P <sub>p</sub>			-0,28	<b>0,75</b>	<b>-0,37</b>		<b>-0,32</b>		<b>-0,38</b>	<b>0,30</b>	<b>-0,51</b>	<b>-0,37</b>	-0,26
Ca <sub>p</sub>	-0,28	-0,29						0,22					
Mg <sub>p</sub>					<b>0,40</b>	<b>0,45</b>	<b>0,51</b>	<b>0,67</b>				<b>0,49</b>	<b>0,44</b>
Na <sub>p</sub>	-0,23	-0,25											
K <sub>p</sub>									<b>0,22</b>		0,38		
Al <sub>p</sub>			-0,28	0,27								-0,22	-0,29
Fe <sub>p</sub>					0,26	<b>0,47</b>		<b>0,32</b>					
Mn <sub>p</sub>		-0,22	<b>-0,37</b>			0,26				<b>-0,24</b>			-0,27
Cu <sub>p</sub>	-0,23	-0,23				0,29			-0,27				-0,24
Zn <sub>p</sub>			0,24	<b>-0,30</b>									
Ni <sub>p</sub>				<b>-0,35</b>	<b>0,46</b>	<b>0,48</b>	<b>0,70</b>	<b>0,58</b>		<b>-0,39</b>		<b>0,64</b>	<b>0,56</b>
Cr <sub>p</sub>				<b>-0,34</b>	<b>0,41</b>	<b>0,54</b>	<b>0,57</b>	<b>0,68</b>		<b>-0,32</b>	0,27	<b>0,54</b>	<b>0,44</b>
Pb <sub>p</sub>	<b>0,35</b>	0,24	<b>0,48</b>	<b>-0,38</b>					<b>0,34</b>		<b>0,30</b>		
	Ale	Al	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb				
N	79	79	79	79	79	79	79	79	79				
C <sub>p</sub>			-0,22						<b>0,46</b>				
N <sub>p</sub>		<b>-0,50</b>											
P <sub>p</sub>	<b>0,36</b>	<b>0,51</b>					-0,24	<b>-0,33</b>	0,29				
Ca <sub>p</sub>													
Mg <sub>p</sub>	-0,28		0,25	<b>0,30</b>			<b>0,54</b>	<b>0,47</b>					
Na <sub>p</sub>					<b>0,34</b>				-0,25				
K <sub>p</sub>					-0,22								
Al <sub>p</sub>		<b>0,55</b>	0,26										
Fe <sub>p</sub>	<b>-0,33</b>	<b>0,35</b>	<b>0,50</b>	<b>0,45</b>		<b>0,42</b>							
Mn <sub>p</sub>		<b>0,31</b>	<b>0,47</b>	<b>0,51</b>	<b>0,49</b>	<b>0,53</b>			-0,22				
Cu <sub>p</sub>			<b>0,34</b>	0,27	<b>0,84</b>	<b>0,55</b>							
Zn <sub>p</sub>													
Ni <sub>p</sub>	<b>-0,39</b>	-0,22	<b>0,41</b>	<b>0,41</b>			<b>0,80</b>	<b>0,66</b>	<b>-0,31</b>				
Cr <sub>p</sub>	<b>-0,38</b>	<b>-0,33</b>	<b>0,42</b>	<b>0,41</b>		0,22	<b>0,53</b>	<b>0,62</b>	-0,25				
Pb <sub>p</sub>	<b>-0,31</b>	-0,23	-0,26	<b>-0,35</b>	-0,26								

En la tabla aparecen las correlaciones que son significativas ( $p < 0,05$ ) y en negrita si éstas son muy significativas. En rojo se señalan las que son mayores a 0,7 (covarianza del 50%) y se marcan en violeta las correlaciones del mismo elemento en planta y suelo. (p=análisis en planta).

#### IV.5.2. COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA SUELO – PLANTA

La transferencia de elementos entre los compartimentos suelo-planta está ligada a la biodisponibilidad en el suelo y a la aptitud del organismo para absorber dichos elementos en las condiciones propias del medio en que se desarrolla. El factor de transferencia suelo-planta integra todos los mecanismos que modifican la biodisponibilidad de un elemento en el suelo. Es un concepto teórico que sirve para modelizar la biodisponibilidad cuando existe una relación lineal entre la concentración en el suelo y la planta, como es el caso que nos ocupa, tal y como se ha visto en el apartado anterior. En realidad, existen numerosas desviaciones dado que estos dos compartimentos tienden a controlar la fijación o la transferencia de un elemento dado. Los coeficientes de transferencia suelo-planta promedio obtenidos en el presente estudio para los brezales de Galicia se recogen en la Tabla IV.39. Se comparan con valores de referencia de la bibliografía (Sauerbeck, 1985; Alloway, 1995), apreciándose que los coeficientes de transferencia suelo-brezo de los elementos traza analizados concuerdan con los valores publicados

Tabla IV.39. Tasas de transferencia en las especies de brezo estudiadas y comparación con los niveles de referencia

	Referencia coeficiente de transferencia suelo-planta	Resultados coeficiente de transferencia. suelo-brezo
Cu	0.1-10 <sup>1,2</sup>	0.60±0.84
Pb	0.01-0.10 <sup>1,2</sup>	0.10±0.05
Zn	1-10 <sup>1,2</sup>	0.24±0.26
Ni	0.1-1 <sup>1,2</sup>	0.28±0.42
Cr	0.01-0.1 <sup>2</sup>	0.04±0.07
Mn	0.1-10 <sup>1,2</sup>	1.82±3.16

1: tomados de Sauerbeck (1985); 2: Alloway (1995).

Realizando este estudio para cada una de las especies de brezo (Tabla IV.40) y en cada material de partida de suelo (Tabla IV.41) se observa que a medida que un elemento traza aumenta su concentración total en el suelo, disminuye su tasa de transferencia a la planta. Esto es especialmente cierto para el Cr y Ni en las especies que crecen en suelos desarrollados sobre serpentinitas (*E. vagans* y *E. erigena*) y para el Cu en *E. australis* de la mina de Touro. La vice-versa también se cumple: donde los contenidos edáficos son muy bajos, las tasas de transferencia se incrementan relativamente, por ejemplo, Cr y Ni en rocas ácidas.

Las tasas de transferencia obtenidas están dentro de los rangos de la bibliografía, con algunas excepciones. Es el caso de Mn en *E. ciliaris* (que presenta una variabilidad muy elevada) y Ni y Mn en cuarcitas, coincidiendo con los bajos niveles de estos elementos en suelo.

Tabla IV. 40. Tasa de transferencia suelo-brezo para las distintas especies estudiadas

	Cu	Mn	Ni	Cr	Zn	Pb
<i>C. vulgaris</i>	1.20±1.79	3.9±9.5	0.22±0.27	0.13±0.31	0.39±0.48	0.11±0.07
<i>D. cantabrica</i>	2.48±3.07	5.0±8.2	0.25±0.24	0.37±0.41	0.82±1.25	0.04±0.05
<i>E. cinerea</i>	1.92±2.75	4.8±10.6	1.24±4.14	0.18±0.34	0.51±0.58	0.09±0.08
<i>E. ciliaris</i>	2.53±3.39	12.7±15.0	0.35±0.30	0.14±0.20	0.64±0.60	0.11±0.08
<i>E. tetralix</i>	3.0	6.8	0.4	0.1	0.19	0.09
<i>E. mackaiana</i>	1.32±1.64	7.0±11	0.46±0.47	0.05±0.09	0.70±1.07	0.11±0.12
<i>E. erigena</i>	0.75±0.84	0.5±0.6	0.13±0.15	0.24±0.34	0.20±0.12	0.11±0.03
<i>E. scoparia</i>	0.19±0.11	0.12±0.02	0.03±0.01	0.01±0.01	0.10±0.04	0.08±0.05
<i>E. umbellata</i>	1.85±2.57	6.6±14	0.92±1.75	0.16±0.31	0.63±0.81	0.09±0.07
<i>E. vagans</i>	0.28±0.17	0.15±0.11	0.10±0.13	0.01±0.01	0.12±0.04	0.16±0.14
<i>E. australis</i>	0.07±0.06	0.45±0.06	0.06±0.07	0.01±0.01	0.10±0.07	0.05±0.02
<i>E. arborea</i>	3.07	6.80	1.42	0.05	2.17	0.06

Tabla IV.41. Tasa de transferencia suelo-brezo en Galicia en base a los materiales de partida del suelo

	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Zn</b>	<b>Pb</b>
<b>A</b>	0.02±0.01	0.32±0.12	0.12±0.05	0.01±0.01	0.06±0.02	0.13±0.10
<b>B</b>	0.17±0.05	0.40±0.14	0.10±0.09	0.01±0.01	0.16±0.05	0.13±0.07
<b>Es</b>	0.12±0.05	0.47±0.34	0.10±0.06	0.28±0.48	0.22±0.06	0.02±0.01
<b>Gr</b>	1.95±1.83	2.13±1.36	0.45±0.69	0.37±0.44	0.34±0.20	0.03±0.03
<b>P</b>	0.53±0.31	2.39±1.49	0.28±0.11	0.01±0.01	0.36±0.09	0.10±0.04
<b>Q</b>	5.71±2.70	15.2±9.70	2.96±5.29	0.36±0.32	1.83±0.67	0.17±0.07
<b>SO</b>	0.75±0.10	7.50±1.05	0.27±0.08	0.09±0.09	0.31±0.06	0.12±0.05
<b>SO</b>	2.27±0.86	3.47±3.66	0.45±0.22	0.20±0.17	1.26±0.91	0.13±0.05
<b>UB</b>	0.37±0.18	0.14±0.06	0.06±0.08	0.01±0.01	0.15±0.09	0.13±0.10
<b>Todas</b>	0.60±0.84	1.82±3.16	0.28±0.42	0.04±0.07	0.24±0.26	0.14±0.06
<b>Ref.</b>	0.1-10 <sup>1,2</sup>	0.1-10 <sup>1,2</sup>	0.1-1 <sup>1,2</sup>	0.01-0.1 <sup>2</sup>	1-10 <sup>1,2</sup>	0.01-0.10

\* Ref=Referencias coeficiente de transferencia suelo-planta (<sup>1</sup>Sauerbeck, 1985; <sup>2</sup>Alloway, 1995)

## IV.6. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

1. La reacción de los suelos de brezal es predominantemente ácida, con un rango de variación entre 3.7 en suelos desarrollados sobre rocas ácidas y 6.5 en suelos sobre rocas ultrabásicas. Desde el punto de vista de la fertilidad química estos suelos se caracterizan por presentar niveles bajos de P ( $<10 \text{ mg. kg}^{-1}$ ), con un fuerte déficit en este nutriente en el 56% de los casos. La deficiencia en Ca ( $<1.5 \text{ cmol(+) kg}^{-1}$ ) también se ha detectado en la mitad de las muestras de suelos, asociada a de moderada a fuerte acidez. En el 34% de los suelos se han encontrado bajos contenidos de K ( $<0.2 \text{ cmol(+) kg}^{-1}$ ). Desequilibrios en K respecto a las otras bases y de la relación Ca/Mg se han detectado únicamente en los suelos desarrollados sobre rocas ultrabásicas.
2. Las concentraciones de elementos mayoritarios en los suelos (Ca, Mg, K, Si, Al y Fe) muestran una gran heterogeneidad que es función de la mineralogía del material de partida. Esto es aún más evidente en el caso de los elementos traza (Mn, Ti, Cu, Zn, Ni, Cr, Pb, As, Br, Rb, Sr, Ga, Y, Nb, Zr y Th) pues su presencia se asocia a una mineralogía muy particular y queda registrada en la naturaleza geoquímica de los suelos (factor herencia).
3. Los resultados del análisis de los suelos han sido sometidos a los análisis de agrupación jerárquica (*hierarchical cluster analysis*) que agrupa los suelos de brezal en función del material de partida de los mismos. Por medio del análisis multivariante de componentes principales (*factor analysis by principal components*) se explica el 87% de la variabilidad de estos suelos. Se han identificado los principales factores que subyacen a dicha variabilidad: reactividad del suelo, mineralogía, contenido de materia orgánica y química del Al. El primer factor, con un 25% de la varianza, es la reactividad del suelo que comprende pH y los parámetros relacionados con la capacidad de intercambio catiónico. La mineralogía, expresada a través de la composición elemental (Ca, K, Si, Fe, Ti, Mn, Zn Pb, As, Rb y Th), es el segundo factor de peso y explica un 17% de la varianza. El contenido de materia orgánica explica un 13% de la varianza (elementos biófilos: C, N e H; elementos unidos a la materia orgánica: Br). El cuarto factor (con un 11%) está ligado fundamentalmente a la química del Al (Al, P y pH en NaF). Un 21% de la varianza se explica por el grado de evolución de la materia orgánica (relación C/N) y muestras de suelos con contenidos elevados de algunos elementos traza (caso de los suelos de los brezales de la mina de Touro).
4. Se han encontrado diferencias significativas en los suelos de brezal en función del material de partida para todas las propiedades químicas estudiadas. Sin embargo, en función de la especie de brezo sólo se encuentran diferencias significativas cuando se trata de especies con una distribución limitada a suelos desarrollados sobre litologías muy particulares, de donde se infiere que la influencia del material de partida del suelo es más importante que la influencia de la propia especie.
5. *Erica vagans*, *Erica scoparia*, *Erica tetralix* sobre gabros y *Erica erigena* actúan como especies indicadoras del ambiente geoquímico en el que viven y las diferencias entre suelos en los que viven vienen dadas por lo restringido de sus hábitats. Sin embargo, los suelos de las demás especies,

más ubicuistas, no destacan para ninguna propiedad del suelo (salvo el caso de *Daboecia cantabrica*).

6. La composición elemental de la planta varía en función del órgano vegetal considerado y así, los elementos biófilos (C, N, P) y las bases (Ca, Mg, Na y K) se concentran preferentemente en hojas y flores; Al, Fe, Cu y Ni se localizan con mayores concentraciones en las raíces. El patrón de distribución de otros elementos (Mn, Cr, Zn y Pb) ya no es tan evidente.
7. El estudio de las diferencias entre las concentraciones elementales en las distintas especies brezos de Galicia pone de relieve a las especies que crecen en ambientes extremos en lo que se refiere al nivel de trofia del medio: por un lado, los brezos de turberas y cuarcitas (*Erica mackaiana* y *Erica arborea*, respectivamente) y por otro lado, los brezos que crecen en rocas básicas y ultrabásicas (*Erica erigena*, *Erica scoparia* y *Erica vagans*). Los brezos más comunes y extendidos en las formaciones de matorral de Galicia muestran concentraciones intermedias y similares entre sí; únicamente cabría destacar el caso de *Daboecia cantabrica*, que resulta ser la más rica en P, Ca y Mg foliar.
8. El análisis de correlaciones entre elementos de la planta indica la existencia de asociaciones fuertes entre los elementos más característicos de las rocas ultrabásicas (Mg, Ni y Cr) y de las rocas básicas (Ca-Mg, Fe-Al), destacando la correlación entre Zn y Pb, que actúan como marcadores de deposición atmosférica en suelos sobre sedimentos orgánicos.
9. El estudio de las diferencias en composición elemental de los brezos atendiendo al tipo de suelo revela de nuevo que este factor posee mayor peso que el factor especie, pues las plantas reflejan fielmente la geoquímica del medio en el que viven. A esta misma conclusión se llega cuando se analizan las correlaciones suelo-planta, siendo las más elevadas las que se establecen entre las propiedades relacionadas con la reactividad del suelo, mineralogía, contenido de materia orgánica del suelo, química del Al, etc.
10. Se observan correlaciones muy significativas entre los contenidos totales de N, P, Mg, Al, Fe, Mn, Cu, Ni y Cr en suelo y planta, lo que pone en evidencia el papel de los brezos como indicadores geoquímicos de los suelos en los que se desarrollan. Sin embargo cabe destacar la relación más débil con los nutrientes en formas asimilables (P) o cambiables (Mg), lo que induce a pensar en la importante función que tienen las micorrizas ericoides en la transferencia de elementos desde el suelo hacia la planta.

## CONCLUSIONS DU CHAPITRE RELATIONS SOL – PLANTE

1. Les sols supportant la bruyère sont principalement acides, avec un intervalle de variation de 3.7 pour les sols développés sur roches acides et 6.5 pour les sols sur roches ultrabasiques. Du point de vue de la fertilité chimique ces sols sont caractérisés par de faibles teneurs de P ( $<10 \text{ mg. kg}^{-1}$ ), avec un important déficit de ce nutriment dans 56% des cas. Des carences en Ca ( $<1.5 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ ) ont également été détectées dans la moitié des échantillons de sol modérément à fortement acides. Dans 34% des sols présentent de faibles teneurs en K ( $<0.2 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ ). Les déséquilibres en K et des autres bases, ainsi que des rapports Ca/Mg faibles ont uniquement été détectés dans les sols développés sur roches ultrabasiques
2. La concentration des éléments majeurs dans les sols (Ca, Mg, K, Si, Al, Fe) montrent une grande hétérogénéité en fonction de la minéralogie du matériel de départ. Cette disparité est encore plus évidente dans le cas des oligo-éléments (Mn, Ni, Cu, Zn, Ni, Cr, Pb, As, Br, Rb, Sr, Ga, Y, Nb, Zr et Th) parce que leur présence est associée à une minéralogie très particulière enregistrée dans la nature géochimique du sol (facteur héritage).
3. Les résultats de l'analyse des sols ont été soumis à l'analyse hiérarchique (*hierarchical cluster analysis*) qui regroupe les sols de bruyère en fonction du matériel de départ de ceux-ci. Par le biais de l'analyse multivariante de composants principaux (*factor analysis by principal components*), il est possible d'expliquer 87% de la variabilité de ces sols. Les principaux facteurs qui sous-tendent cette variabilité ont été identifiés: réactivité des sols, minéralogie, teneur en matière organique et teneur en Al. Le premier facteur, expliquant 25% de la variance, est la réactivité du sol qui comprend le pH et les paramètres liées à la capacité d'échange cationique. La minéralogie exprimée à travers la composition d'éléments (Ca, K, Si, Fe, Ti, Mn, Zn, Pb, As, Rb et Th) est le deuxième facteur expliquant 17% de la variance. La teneur en matière organique explique 13% de la variance (éléments biophiles: C, N et H ; éléments liés à la matière organique: Br). Le quatrième facteur (avec 11%) est lié essentiellement à la teneur en Al (Al, P et le pH en NaF). Environ 21% de la variance est expliqué par le degré d'évolution de la matière organique (exprimée à travers le rapport C/N) et des élevés teneurs des éléments trace (cas des sols de la mine de Touro).
4. Des différences significatives ont été découvertes dans les sols de bruyère en fonction des matériaux de départ pour toutes les propriétés chimiques étudiées. Néanmoins, en fonction de l'espèce de bruyère, il n'apparaît des différences significatives dans les propriétés des sols que quand il s'agit d'espèces dont la répartition est limitée à des sols développés sur des lithologies bien particulières, ce qui permet de déduire l'influence du matériel de départ du sol davantage que celle de l'espèce en elle-même.
5. *Erica vagans*, *Erica scoparia*, *Erica tetralix* sur les gabbros et *Erica erigena*, agissent comme espèces indicatrices de l'environnement géochimique dans lesquelles elles vivent et les différen-

ces entre les sols proviennent de leurs habitats limités si particuliers; cependant, les espèces les plus ubiquistes n'ont mis le sol en valeur pour aucune propriété (à l'exception du cas de *Daboecia cantabrica*).

6. La composition élémentaire de la plante varie en fonction de l'organe végétal considéré et de la sorte, les éléments biophiles (C, N, P) et les bases (Ca, Mg, Na et K) se concentrent de préférence dans les feuilles et les fleurs; Al, Fe, Cu et Ni se situent en plus grandes concentrations dans les racines. Le modèle de répartition d'autres éléments (Mn, Cr, Zn et Pb) n'est plus aussi évident.
7. L'étude des différences entre les concentrations élémentaires dans les différentes espèces de bruyères de Galice met en évidence les espèces qui poussent dans des environnements extrêmes en ce qui concerne le niveau de trophie du milieu: d'un côté, les bruyères de la tourbe et de quartzites (*Erica mackaiana* y *Erica arborea*, respectivement) et, de l'autre, les bruyères qui poussent sur roches basiques et ultrabasiques (*Erica erigena*, *Erica scoparia* y *Erica vagans*). Les bruyères les plus répandues et communes dans les landes de Galice présentent des concentrations intermédiaires et similaires entre elles; il conviendrait de relever uniquement le cas de *Daboecia cantabrica*, qui s'avère la plus riche en P, Ca et Mg foliaire
8. L'analyse des corrélations entre les éléments de la plante indique l'existence d'importantes associations entre les éléments les plus caractéristiques des roches ultrabasiques (Mg, Ni et Cr) et des roches basiques (Ca-Mg, Fe-Al), soulignés par la corrélation entre Zn et Pb, qui constituent des marqueurs des dépôts atmosphériques sur les sols et les sédiments organiques.
9. L'étude des différences dans la composition élémentaire des bruyères en fonction du type de sol où vit la plante révèle que ce facteur a plus de poids que le facteur espèce car les plantes reflètent fidèlement la géochimie du milieu où elles vivent. Cette conclusion est étayée par l'analyse des corrélations entre le sol et les plantes, parce que les facteurs prépondérants sont les propriétés liées à la réactivité des sols, la composition minéralogique et élémentaire des sols, la teneur en matière organique, la teneur en Al, etc.
10. On observe des corrélations très significatives entre les contenus totaux de N, P, Mg, Al, Fe, Mn, Cu, Ni et Cr dans le sol et celles des plantes; soulignent le rôle des bruyères comme indicateurs géochimiques du sol sur lequel elles se développent. Il convient, cependant, de souligner le plus faible rapport avec les formes assimilables (P) ou échangeables (Mg), ce qui suggère un rôle important des mycorhizes ericoïdes dans le transfert d'éléments du sol à la bruyère.





## **CAPÍTULO V**

### **FITOLITOS**



## V.1. INTRODUCCIÓN

El silicio es un elemento muy estable y el segundo en abundancia de la litosfera (27.7%). Las plantas lo absorben en forma soluble como ácido monosilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ), cuya concentración varía entre 0.1 y 0.6 mM (Epstein, 1999). Su solubilidad aumenta en medios alcalinos y varía en presencia de otros elementos (Al, Ca, Fe, P, etc.) y de materia orgánica (Pais & Benton, 2000).

El Si está presente en las plantas en cantidades equivalentes a las de los macronutrientes como Ca, Mg y P, constituyendo entre el 0,1 y el 10% de su peso seco. Pais & Benton (2000) lo definen como un elemento no esencial para las plantas, pero sí beneficioso, pues valores por debajo de 6 mg kg<sup>-1</sup> resultan críticos en algunos tejidos vegetales. En general el Si se define como esencial o beneficioso en función de la especie (Hodson & Evans, 1995) y así por ejemplo está demostrada su esencialidad en diatomeas (Martín-Jézéquel *et al.*, 2000) y Equisetáceas (Chen & Lewin, 1969). En los últimos años ha aumentado el interés por estudiar el papel de este elemento y aunque los fisiólogos vegetales no lo consideren esencial, está demostrado que las plantas que crecen en suelos pobres en Si frecuentemente son más débiles, muestran trastornos en el crecimiento y la reproducción, y en general, resultan más susceptibles al estrés (Epstein, 1994; 1999).

El Si se acumula especialmente en las gramíneas y sus beneficios han sido descritos en la literatura científica. Tiene una función estructural y protectora frente al estrés biótico y abiótico (Hodson & Sanger, 2002; Fauteux *et al.*, 2005; Aguirre *et al.*, 2007). Entre las ventajas estructurales que aporta están el conferir una mayor resistencia en granos de cereales, como trigo y arroz (Gartner & Paris-Pireyre, 1984; Ma *et al.*, 2004), ofrecer resistencia en gramíneas a la compresión durante la transpiración y mantener la turgencia en ausencia de agua (Zurro, 2006); y también mejora la retención del agua en los tejidos (Romero-Aranda *et al.*, 2006). La fertilización con Si en calabaza (*Cucurbita sp.*), avena (*Avena sativa*) y sorgo (*Sorghum bicolor*) aumenta la síntesis de compuestos con propiedades antibióticas y favorece la acumulación de compuestos fenólicos y lignina, lo que disminuye la calidad nutricional y la digestibilidad de las plantas (Batista *et al.*, 2005).

En medios salinos reduce el daño oxidativo a las membranas causado por el exceso de iones (Epstein, 1994; Gunes *et al.*, 2007). Horst *et al.* (1999) sugieren que el Si modifica las propiedades de intercambio iónico en la pared celular y aunque se han encontrado evidencias genéticas de los posibles mecanismos de adsorción y acumulación de este elemento, aún queda mucho por investigar acerca de su papel bioquímico y fisiológico en los seres vivos (Aguirre *et al.*, 2007).

Varios experimentos han demostrado su papel protector frente a los metales. Así, la presencia de Si elimina la necrosis por Mn en cebada (*Hordeum vulgare*) cultivada *in vitro* y aumenta la tolerancia al Al en algodón (*Gossypium hirsutum*) y en maíz (*Zea mays*). En este último disminuye los efectos inhibitorios del Al sobre el alargamiento de las raíces (Epstein, 1999) y aumenta la tolerancia al Cd y Zn (Vieira & Araújo, 2008), mientras que en coníferas permite un mayor paso de Al hacia el tejido aéreo sin evidencias de toxicidad (Hodson & Evans, 1995; Hodson & Sanger, 1998); un posible mecanismo implicado sería la coprecipitación de Al y Si (Sangster *et al.*, 1997; Cocker *et al.*, 1998).

Las plantas acumulan Si en forma de fitolitos, corpúsculos de sílice opalina ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) que sintetizan durante su ciclo vegetativo (Piperno, 1988; 2006). Son el resultado de un proceso de mineralización que, una vez producido, generalmente es irreversible (Raven 1983; Epstein, 1994). La deposición de la sílice tiene lugar tanto en el interior de las células (por ejemplo, en vacuolas como en la pared vegetal, e incluso en los espacios intercelulares (Blackman, 1971; Pearsall, 1988; Carnelli *et al.*, 2001) y su tamaño está comprendido entre 5 y 200  $\mu\text{m}$  (Alfárez, 1972). Además de la sílice pueden contener concentraciones significativas de otros elementos ocluidos o quimiabsorbidos como Al, Fe, Ti, Mn, Cu, C, P y elementos alcalinos y alcalino-térreos (Wilding & Dress, 1971).

El análisis de fitolitos surge de toda una serie de estudios de microscopía realizados por biólogos alemanes en el primer tercio del s. XIX. Durante mucho tiempo estas partículas fueron denominadas de forma generalista biolitos, pasándose a llamar posteriormente fitolitos de ópalo, ópalo, sílice opalina, ópalo herbáceo o sílice biogénica. En los últimos años se ha designado el término fitolito como el más adecuado (Zurro, 2006) y en sentido estricto habría que denominarlos silicofitolitos para diferenciarlos de otras biomineralizaciones de distinta composición química como los fitolitos de oxalato de calcio (Fink, 1991; Finley, 1999).

Con la entrada de los restos orgánicos de la planta al suelo los fitolitos quedan incorporados a la fracción mineral del mismo. Presentan morfologías y tamaño variados en función de la célula que los produjo por lo que tienen una gran importancia taxonómica, ya que ciertas formas resultan diagnósticas para determinadas familias (Twiss *et al.*, 1969; Bertoldi de Pomar, 1975) y en ocasiones se puede llegar al nivel de especie (Zurro, 2006). Cuando se conservan adecuadamente en el suelo pueden ser utilizados en la identificación de la flora del registro fósil, abarcando el período mejor estudiado desde principios del Cenozoico hasta los depósitos más recientes (Twiss *et al.*, 1969; Bertoldi de Pomar, 1975; Piperno, 1988). Estos estudios han centrado su atención, como es lógico, en las familias botánicas con una mayor producción de los mismos como gramíneas, equisetáceas, ciperáceas y palmáceas (Honaine, 2005).

Zurro (2006) describe tres enfoques en el estudio de los fitolitos; el primero sería un enfoque actualista, que pretende identificar las especies no productoras y productoras, dilucidar sus funciones en el organismo o ambos; el segundo sería de tipo histórico, utilizando los fitolitos presentes en sedimentos o materiales arqueológicos para la reconstrucción medioambiental; y el tercer enfoque, sería la propuesta de clasificaciones y metodologías para el tratamiento de sedimentos y especies actuales, en definitiva, la creación de colecciones de referencia.

Una de las funciones principales de las formaciones biogénicas de sílice es, como ya se ha referido de forma implícita en la introducción al Capítulo, la de sostén, sobre todo en ciertas familias botánicas. Este aspecto es bien conocido desde hace tiempo (Maa & Takahashi, 2002) y posee un interés secundario en el caso de especies leñosas. Los estudios sobre el papel de los fitolitos en otros grupos botánicos distintos de los grandes productores planteaban el papel de los fitolitos al aumentar la resistencia frente al Al en coníferas (Birchall, 1995; Hodson & Evans, 1995) y a los metales pesados en plantas acumuladoras (Neumann *et al.*, 1997; Bringezu *et al.*, 1999). Este mecanismo

sería de vital importancia en el brezo, *E. andevalensis*, capaz de desarrollarse adecuadamente en suelos muy contaminados con altas concentraciones de arsénico y metales pesados (Buján; 2006, 2007) y conferiría a las especies que lo poseen una cierta ventaja adaptativa en comparación con otras especies más sensibles a los metales pesados. En este sentido ya Montes Botella (2001) apuntaba la posibilidad de que los metales fueran inertizados con Si en vacuolas o en la pared celular de *Erica andevalensis*.

En este Capítulo y dentro del enfoque actualista de Zurro (2006) se pretende demostrar el papel de los fitolitos en el incremento a la resistencia frente al estrés metálico en las especies de brezo de Galicia. Para ello se estudia la relación que pudiera existir entre algunas propiedades de los suelos con la concentración o cantidad de fitolitos presentes en los brezos de Galicia, su distribución en la planta y su composición elemental.

## V.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### V.2.1. CONTENIDO DE CENIZAS Y FITOLITOS

El estudio de la distribución del porcentaje de cenizas según el órgano vegetal considerado (flor, hoja, tallo y raíz) pone en evidencia la existencia de 3 grupos con diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre ellos. Uno de ellos estaría formado por los tallos ( $1.19 \pm 1.08 \%$ )<sup>a</sup> y las raíces ( $1.18 \pm 0.53 \%$ )<sup>a</sup>, que presenta los valores medios más bajos, pues sobrepasan apenas el 1%. El segundo lo constituyen las flores ( $2.42 \pm 0.44 \%$ )<sup>b</sup> y el tercero, con los contenidos más elevados, es el de las hojas ( $3.21 \pm 1.00 \%$ )<sup>c</sup>.

En cuanto a los fitolitos existen dos grupos con diferencias muy significativas ( $p < 0.01$ ) entre ellos: uno formado por los tallos ( $0.43 \pm 0.24 \%$ )<sup>a</sup> y las raíces ( $0.44 \pm 0.19 \%$ )<sup>a</sup>, con valores medios muy similares entre sí, y otro por las hojas ( $0.67 \pm 0.59 \%$ )<sup>b</sup> que muestran las concentraciones más altas. Considerado el promedio el grupo de las flores presenta valores intermedios ( $0.58 \pm 0.24 \%$ )<sup>ab</sup> y no se diferencia significativamente de ninguno de los anteriores. Cabe destacar la distancia que hay entre el promedio y la mediana (Tabla V.1) en hojas (0.67% y 0.42%, respectivamente) y su mayor desviación estándar (0.59%). Esto indica que se trata del grupo más heterogéneo con valores individuales que varían entre 0.15 y 2.88 %. Por el contrario, los otros órganos presentan medias y medianas más próximas, con desviaciones estándar menores (Figura V.1).

Tabla V.1. Porcentaje de cenizas y fitolitos en brezos de Galicia

Cenizas	N	media	mediana	SD	mínimo	máximo
<i>Flores</i>	33	2.42	2.27	0.44	1.77	3.36
<i>Hojas</i>	108	3.21	2.95	1.00	1.71	5.86
<i>Tallos</i>	134	1.18	1.09	0.53	0.02	5.65
<i>Raíces</i>	97	1.19	1.08	0.66	0.15	3.03

Fitolitos	N	media	mediana	SD	mínimo	máximo
<i>Flores</i>	33	0.58	0.54	0.24	0.12	1.14
<i>Hojas</i>	108	0.67	0.42	0.59	0.15	2.88
<i>Tallos</i>	134	0.43	0.40	0.24	0.04	1.56
<i>Raíces</i>	97	0.44	0.43	0.19	0.03	0.94

N=número de muestras y SD= Desviación estándar.

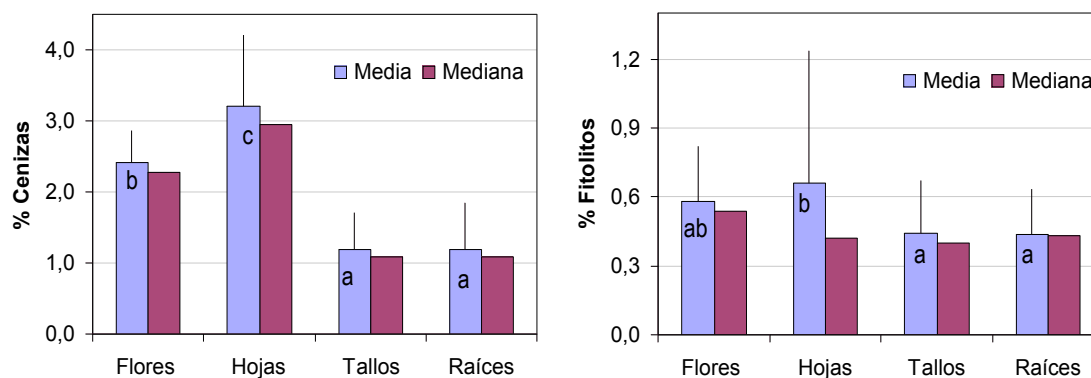


Figura V.1. Porcentaje de cenizas y fitolitos por órgano vegetal. Cada letra indica la pertenencia a un grupo significativamente diferente y las barras representan las desviaciones estándar

### V.2.2. RELACIÓN ENTRE CENIZAS Y FITOLITOS

Considerando el conjunto de todas las muestras analizadas el valor promedio de la relación Fitolitos/Cenizas es de 0.30, encontrándose valores que oscilan entre 0 (no hay fitolitos en las cenizas o estos se encuentran por debajo del límite de detección del método) y 0.70 (70% de las cenizas son fitolitos). La correlación entre ambas variables ( $r = 0.697$ ) es muy significativa ( $p < 0.01$ ) para todo el conjunto de muestras. En la Figura V.2 se aprecian al menos dos distribuciones diferentes de las muestras.

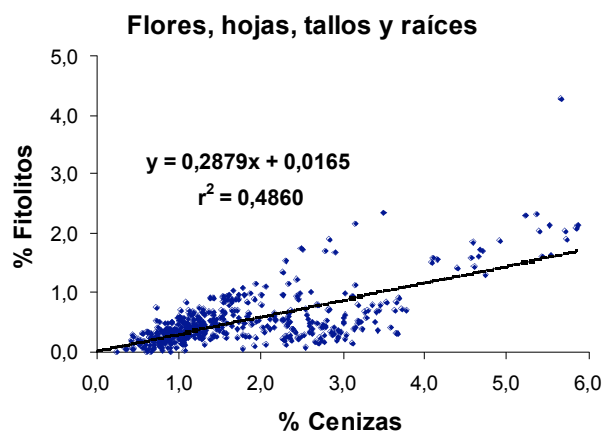


Figura V.2. Relación entre contenido de cenizas y fitolitos para el conjunto de muestras analizadas.

En efecto, un análisis pormenorizado indica la existencia de distintas rectas de regresión en función del órgano vegetal considerado. En todos los casos se encuentran correlaciones muy significativas alcanzando coeficientes de 0.596 para las flores y 0.763 para los tallos; los valores más elevados se encuentran en raíces y hojas con coeficientes de correlación de 0.929 y 0.902, respectivamente. A la vista de estos resultados se deduce que a partir de los porcentajes de cenizas se podrían estimar los contenidos en fitolitos, sobre todo en el caso de raíces y hojas (Figura V.3).

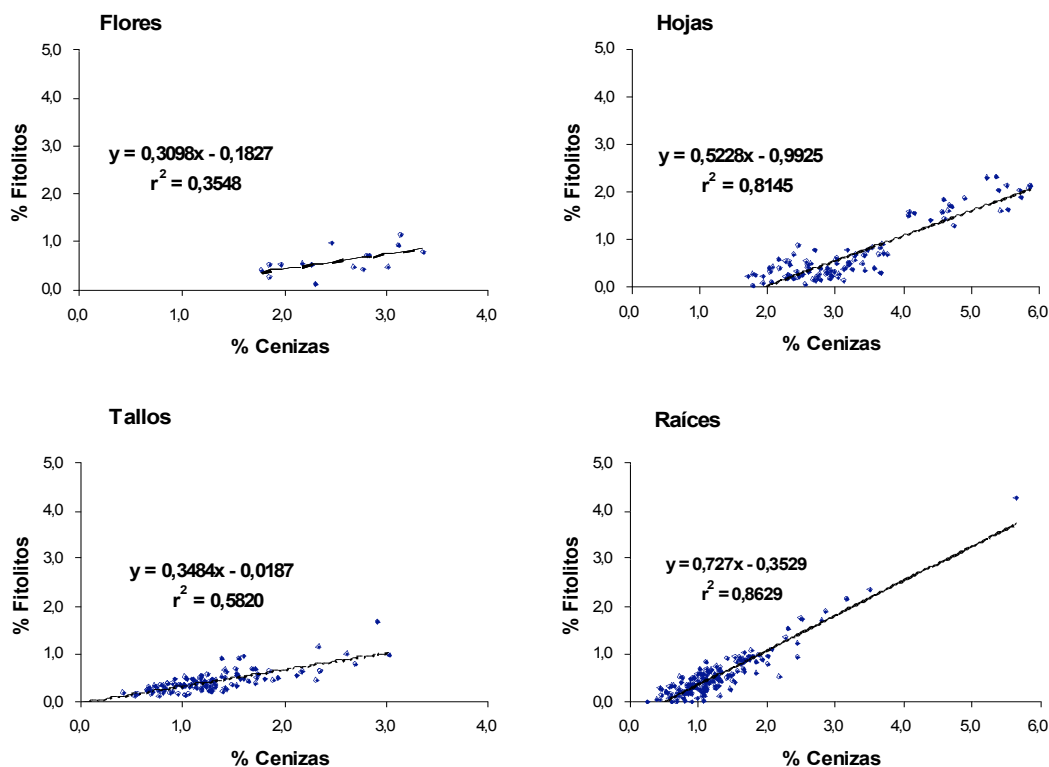


Figura V.3. Producción de fitolitos por órganos vegetales.

También destacan las diferencias en los puntos de corte con los ejes de abscisas para cada compartimento vegetal. Así, para tallos se cuantifican fitolitos a partir de contenidos de cenizas de 0.05%; para raíces y flores son necesarios un 0.5 y 0.6% mínimo de cenizas, respectivamente, valor que se incrementa hasta casi el 2% en el caso de las hojas. Esto sugiere que casi todos los órganos acumulan fitolitos a partir de un cierto nivel de concentración elemental, hecho que parece minimizado en los tallos. Por otro lado el porcentaje de fitolitos en cenizas es mayor en la raíz, que es la que tiene la pendiente más elevada (0.727), seguida de las hojas (0.523); mientras que los órganos que menos cenizas parecen destinar a ese fin son los tallos (0.348) y las flores (0.310).

Este patrón general de distribución de fitolitos en los brezos coincide con las observaciones obtenidas por otros autores relativas al origen de la sílice que se encuentra en la vegetación. Así, la concentración de los fitolitos en la planta varía con su estado fenológico y con la parte de la misma (Bertoldi de Pomar, 1975; Zucol, 2001). En general, se aprecia que la cantidad de sílice es mayor en los órganos que poseen una tasa de transpiración mayor (Madella, com. pers.). Esta relación se cumple para el conjunto de muestras analizadas en este trabajo. Ahora bien, no se puede obviar la estrecha relación encontrada entre un metabolismo activo (que se refleja en un porcentaje alto de cenizas) y el nivel de fitolitos en los diferentes órganos vegetales. Expresado en otros términos, se ha observado que coinciden altas tasas metabólicas con un mayor nivel de transpiración, y porcentajes altos de fitolitos y cenizas en los órganos más activos: principalmente hojas y en segundo lugar, flores.

Para ver si el diámetro del órgano puede influir en el contenido de fitolitos se ha abordado un estudio más detallado aislando los fitolitos en raíces y tallos finos (<2 mm) frente a raíces y tallos gruesos (> 2 mm) en 6 plantas que se analizan por triplicado. En la Tabla V.2 se muestran los resultados obtenidos (media y desviación estándar) en 4 especies (*C. vulgaris*, *D. cantabrica*, *E. mackaiana* y *E. umbellata*) en 3 suelos diferentes: un Tecnosol espólico (A2), un Podzol Úmbrico (Q1) y un Histosol sáprico (SO1).

Tabla V.2. Contenido de fitolitos (%) en tallos y raíces de distintos tamaños (n=3)

Muestra	%Tallo <2mm	%Tallo >2mm	%Raíz <2mm	%Raíz >2mm
<b>A2cv</b>	1.53±0.04	0.82±0.17	0.24±0.05	0.49±0.09
<b>A2d</b>	0.19±0.04	0.30±0.10	0.40±0.09	0.15±0.02
<b>A2u</b>	0.31±0.13	0.66±0.04	0.83±0.25	0.40±0.15
<b>Q1m</b>	0.40±0.10	0.17±0.03	0.62±0.06	0.48±0.04
<b>SO1cv</b>	0.19±0.03	0.03±0.02	0.15±0.03	0.19±0.01
<b>SO1m</b>	0.10±0.04	0.05±0.02	0.52±0.16	0.47±0.14

A2= Tecnosol espólico (cv=*Calluna vulgaris*, d=*Daboecia cantabrica*, u=*Erica umbellata*),  
Q1= Podzol úmbrico (m=*E. mackaiana*) y SO=Histosol sáprico (cv=*C. vulgaris*, m=*E. mackaiana*)



Se observa que, en general, la producción de fitolitos disminuye con el grosor del órgano, aunque esta tendencia no se cumple ni en todas las especies, ni en los dos tipos de órgano vegetal analizado. Así, mientras *D. cantabrica* y *E. umbellata* (A2) presentan una mayor proporción de fitolitos en tallos gruesos que en finos, lo contrario se observa en *C. vulgaris* y *E. mackaiana*. En lo que respecta a las raíces, los porcentajes de fitolitos resultan ser mayores en las raíces finas de *D. cantabrica*, *E. umbellata* (A2) y *E. mackaiana* y en las raíces > de 2 mm de *C. vulgaris* (A2). Cuando se trata de *E. mackaiana* y *C. vulgaris* de turberas las diferencias entre valores medios de raíces mayor y menor de 2 mm no son tan acusadas y desde luego, parece apreciarse un cierto efecto del lugar del que proceden las plantas. Aunque en todos los casos se evidencian diferencias entre tamaños, hay que contar con la limitación debida al escaso número de muestras utilizadas.

### V.2.3. PRODUCCIÓN DE FITOLITOS PARA CADA ESPECIE DE BREZO EN CADA SUELO

En la Figura V.4 se representan los porcentajes medios de fitolitos en flores, hojas, tallos y raíces junto a sus desviaciones estándar, para cada especie en cada suelo estudiado. En dicha figura se observa como *Calluna vulgaris* destaca por ser la especie que más fitolitos produce en hojas en todos los suelos, en comparación con las otras especies de brezos presentes en su mismo hábitat. Además, presenta un patrón de acumulación preferente, siendo el órgano productor por excelencia la hoja, que contiene siempre más fitolitos que el tallo y la raíz, de modo que la concentración media foliar de fitolitos representa entre un 47 y un 76% del total promediado de la planta. El valor medio de fitolitos obtenido en la mina de Touro (A2) es el más elevado ( $2.54 \pm 0.25\%$ ) no sólo para *C. vulgaris*, sino para todo el conjunto de muestras estudiadas. Esta concentración foliar supone el doble de la que se encuentra en tallos y es 7.5 veces mayor que la de raíces. Seguiría en orden decreciente de importancia el valor medio procedente de serpentinitas (S5;  $1.59 \pm 0.07\%$ ), mientras que los valores más bajos se encuentran en las cuarcitas del Pico Sacro (Q3;  $0.92 \pm 0.43\%$ ) y las turberas del Xistral (SO1;  $0.60 \pm 0.08\%$ ).

La segunda especie en producción media de fitolitos en hojas es *E. australis* ( $1.77 \pm 0.27\%$ ), que se ha muestreado sólo en el brezal de Touro, seguida de *E. cinerea* ( $0.99 \pm 0.23\%$ ) procedente del mismo lugar. Además *E. australis* destaca además por su elevado contenido promedio de fitolitos en flores, que con un ( $1.04 \pm 0.14\%$ ) cuenta con la mayor producción.

En general, se aprecia que los porcentajes de fitolitos en flores son de los más elevados, especialmente en *E. mackaiana* de serpentinitas ( $0.61 \pm 0.19\%$ ) y *E. umbellata* en todos los casos ( $0.48-0.66\%$ ).

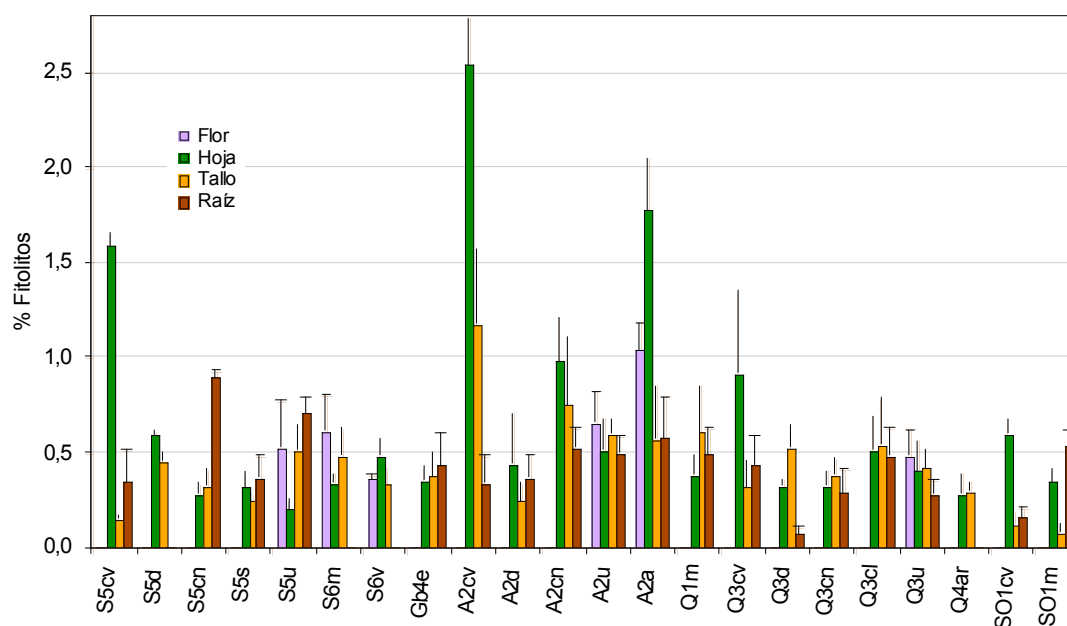


Figura V.4. Producción media de fitolitos en flores, hojas, tallos y raíces para las distintas especies. Las barras representan las desviaciones estándar.

Dentro del conjunto de las muestras consideradas se aprecia que las máximas concentraciones de fitolitos se encuentran en un órgano diferente en función de la especie, del tipo de suelo en que se desarrollan las plantas, o ambos. Ya se ha comentado anteriormente que *C. vulgaris* muestra los máximos valores en hojas en todo tipo de suelos, constituyendo una excepción notable. *E. scoparia* y *E. erigena* que concentran los fitolitos preferentemente en las raíces con valores de  $(0.37 \pm 0.12\%)$  y  $(0.43 \pm 0.18\%)$ , respectivamente.

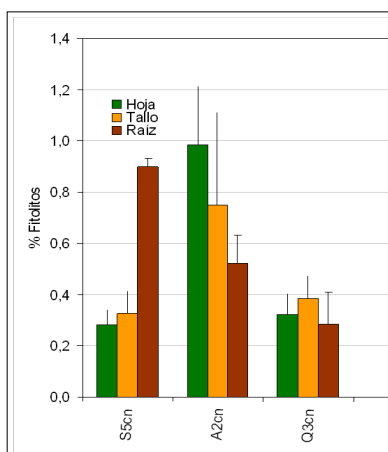


Figura V.5. % de fitolitos en *E. cinerea*.

Otras especies muestran un mayor porcentaje de fitolitos en órganos diferentes dependiendo del suelo en que viven. Así por ejemplo *E. cinerea* (Figura V.5) presenta los máximos valores de fitolitos en las raíces cuando crece sobre serpentinitas  $(0.90 \pm 0.03\%)$ , en hojas sobre anfibolitas  $(0.99 \pm 0.23\%)$  y en tallos en los suelos de cuarcitas  $(0.99 \pm 0.23\%)$ . *D. cantabrica*, *E. mackaiana* y *E. umbellata* muestran un comportamiento similar.

La acumulación preferente en tallos se observa en 5 de las 22 combinaciones consideradas (6 si se descarta el resultado obtenido en las flores de *E. umbellata*), todas ellas sobre cuarcitas. El rango de las concentraciones medias oscilan entre 0.29% (*E. arborea*) y 0.54% (*E. ciliaris*).

La acumulación preferente en raíces tiene lugar en 5 de las 22 combinaciones estudiadas. Se trata *E. mackaiana* en las turberas ( $0.53 \pm 0.09\%$ ) y 4 brezos de rocas básicas y ultrabásicas *E. scoparia*, *E. erigena*, *E. cinerea* y *E. umbellata* con un rango entre  $0.37\%$  (*E. scoparia*) y  $0.90\%$  (*E. cinerea*).

La acumulación preferente de fitolitos en hojas se encuentra en 9 de las 22 combinaciones analizadas que se concentran en las anfibolitas de Touro y en la serpentinitas. El rango de concentraciones medias varía entre  $0.20\%$  (*E. umbellata*) y  $2.54\%$  (*C. vulgaris*).

Otras especies no se han podido comparar en distintos tipos de suelos y muestra preferencia por acumular fitolitos en hojas (*E. australis* en Touro y *E. vagans* en serpentinitas de A Capelada) o en tallos (*E. ciliaris* y *E. arborea* en cuarcitas del Xistral).

A la vista de estos resultados se deduce que existe un patrón de distribución común al conjunto de todas las especies presentes en los suelos húmedos tipo Gley (S5, Gb4) e Histosol (SO1). Dicho patrón consiste en una mayor acumulación de fitolitos en la raíz en condiciones de anaerobiosis (excepto el caso de *C. vulgaris*) que concuerda con las mayores acumulaciones de fitolitos en gramíneas de brañas (10-15%) frente a gramíneas de praderas secas (1-3%) (Hodson *et al.*, 1997). En estos medios en los que la disponibilidad de Fe y otros metales aumenta (Jones & Etherington, 1970) y la transpiración está minimizada, la síntesis de fitolitos en la raíz podría constituir un mecanismo de inmovilización de estos elementos que impida o minimice su translocación hacia el tejido aéreo. Este mecanismo detoxificador podría ser inherente a los brezos *E. erigena* y *E. scoparia* que crecen en suelos húmedos derivados de rocas básicas y ultrabásicas con elevados niveles de metales pesados para este tipo de vegetación. Y podría ser facultativo en otras especies más generalistas cuando crecen en esos medios tan especiales (*E. cinerea* y *E. umbellata*). Para los brezos que crecen en suelos bien aireados el patrón de distribución de fitolitos en la planta es diferente y se asocia a la parte aérea en todos los casos; en la mina de Touro los fitolitos se concentran en la hoja, mientras que en los suelos más pobres, derivados de cuarcitas la acumulación tiene lugar preferentemente en el tallo.

#### V.2.4. PRODUCCIÓN DE FITOLITOS POR ESPECIE

Los resultados se han sometido a un análisis de varianza para ver si existen diferencias significativas en el contenido de fitolitos en cada órgano en función de la especie (Tabla V.3).

En lo que respecta a las flores destaca *E. australis* ( $1.04 \pm 0.14\%$ )<sup>b</sup> que presenta valores significativamente mayores que las otras especies analizadas: *E. mackaiana* ( $0.61 \pm 0.19\%$ )<sup>a</sup>, *E. umbellata* ( $0.57 \pm 0.19\%$ )<sup>a</sup> y *E. vagans* ( $0.36 \pm 0.02\%$ )<sup>a</sup>, que no se diferencian significativamente entre sí.

Para hojas *E. australis* ( $1.77 \pm 0.27$ )<sup>b</sup> y *C. vulgaris* son las dos especies ( $1.41 \pm 0.83$ )<sup>b</sup> productoras por excelencia, con valores significativamente superiores a las demás especies que pertenecen a un mismo grupo. En este último se encuentran brezos con valores medios de fitolitos en torno a  $0.50\%$  (*E. cinerea*, *E. vagans* y *E. ciliaris*); *D. cantabrica* con  $0.45\%$ ; un subgrupo formado por brezos con contenidos medios próximos a  $0.35\%$  (*E. mackaiana*, *E. erigena*, *E. umbellata* y *E.*

*scoparia*); y finalmente *E. arborea* que tiene la media más baja en fitolitos foliares con un valor 0.28%.

Tabla V.3. Porcentaje de fitolitos (media y desviación estándar) por especies en brezos de Galicia

	Flores	Hojas	Tallos	Raíces
<i>Calluna vulgaris</i>		(1.41±0.83)	(0.51±0.36) (22) <sup>ab</sup>	(0.32±0.06) (20) <sup>ab</sup>
<i>Daboecia cantabrica</i>		(0.45±0.07) (17) <sup>a</sup>	(0.41±0.14) (12) <sup>ab</sup>	(0.22±0.15) (8) <sup>a</sup>
<i>Erica cinerea</i>		(0.53±0.34) (12) <sup>a</sup>	(0.49±0.19) (18) <sup>a</sup>	(0.57±0.15) (15) <sup>c</sup>
<i>Erica ciliaris</i>		(0.51±0.18) (9) <sup>a</sup>	(0.54±0.24) (7) <sup>ab</sup>	(0.48±0.14) (10) <sup>a</sup>
<i>Erica mackaiana</i>	(0.61±0.19) (5) <sup>a</sup>	(0.36±0.02) (16) <sup>a</sup>	(0.29±0.02) (17) <sup>a</sup>	(0.51±0.01) <sup>a</sup>
<i>Erica erigena</i>		(0.35±0.08) (3) <sup>a</sup>	(0.38±0.13) (6) <sup>ab</sup>	(0.43±0.18) (3) <sup>abc</sup>
<i>Erica scoparia</i>		(0.32±0.08) (4) <sup>a</sup>	(0.25±0.03) (3) <sup>a</sup>	(0.37±0.12) (6) <sup>abc</sup>
<i>Erica umbellata</i>	(0.57±0.19) (13) <sup>a</sup>	(0.37±0.06) (17) <sup>a</sup>	(0.51±0.09) (23) <sup>b</sup>	(0.49±0.12) (19) <sup>bc</sup>
<i>Erica vagans</i>	(0.36±0.02) (2) <sup>a</sup>	(0.48±0.09) (5) <sup>a</sup>	(0.33±0.08) (9) <sup>a</sup>	
<i>Erica australis</i>	(1.04±0.14) (13) <sup>a</sup>	(1.77±0.27) (3) <sup>b</sup>	(0.57±0.28) (9) <sup>ab</sup>	(0.57±0.22) (5) <sup>bc</sup>
<i>Erica arborea</i>		(0.28±0.11) (3) <sup>a</sup>	(0.29±0.05) (7) <sup>a</sup>	

En cada columna las medias con la misma letra supraíndice no son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ). Entre paréntesis se indica el número de muestras analizadas en cada órgano vegetal.

Con respecto al contenido de fitolitos en tallos las diferencias entre las especies no son tan acusadas como se aprecia con las hojas y sólo *E. umbellata* ( $0.51 \pm 0.09\%$ )<sup>b</sup> presenta valores significativamente mayores que *E. vagans* ( $0.33 \pm 0.08\%$ )<sup>a</sup>, *E. arborea* ( $0.29 \pm 0.05\%$ )<sup>a</sup> y *E. mackaiana* ( $0.29 \pm 0.02\%$ )<sup>a</sup>. Las especies restantes no se diferencian significativamente entre sí y sus promedios varían entre 0.25 y 0.57%.

*E. cinerea* ( $0.57 \pm 0.15\%$ )<sup>c</sup> tiene concentraciones significativamente mayores que *C. vulgaris* ( $0.32 \pm 0.06\%$ )<sup>ab</sup> y *D. cantabrica* ( $0.22 \pm 0.15\%$ )<sup>a</sup>. Esta última que muestra además presenta niveles significativamente menores que *E. australis* ( $0.57 \pm 0.22\%$ )<sup>bc</sup> y *E. umbellata* ( $0.49 \pm 0.12\%$ )<sup>bc</sup>. Las especies restantes (*E. ciliaris*, *E. mackaiana*, *E. erigena* y *E. scoparia*) no presentan una producción de fitolitos en raíces significativamente diferente entre sí.

#### V.2.5. PRODUCCIÓN DE FITOLITOS POR MATERIAL DE PARTIDA DEL SUELO

Se realiza un análisis de varianza para los contenidos de fitolitos en los distintos órganos de la planta en función del material de partida del suelo (Tabla V.4.). Los resultados evidencian que, para la producción de fitolitos en flores, ninguno de los materiales de partida se diferencia significativamente, aunque los valores más elevados se encuentran sobre anfíbolitas en la mina de Touro con un ( $0.81 \pm 0.25\%$ )<sup>a</sup> y los más bajos en las cuarcitas ( $0.48 \pm 0.25\%$ )<sup>a</sup>. En hojas también en anfíbolitas están las mayores concentraciones ( $1.25 \pm 0.89\%$ )<sup>c</sup> con diferencias muy significativas ( $p < 0.01$ ) con respecto a los otros grupos, la segunda posición con valores intermedios la ocupan las serpentinitas ( $0.54 \pm 0.48\%$ )<sup>b</sup> que también se diferencia significativamente ( $p < 0.05$ ) del tercer grupo, formado por las cuarcitas ( $0.45 \pm 0.22\%$ )<sup>a</sup> y los sedimentos orgánicos ( $0.48 \pm 0.18\%$ )<sup>a</sup>.

Para tallos, de nuevo los valores más elevados están en la mina de Touro ( $0.67\pm0.34$ )<sup>c</sup> que se diferencia muy significativamente ( $p<0.01$ ) de los demás grupos. Valores intermedios se encuentran en las especies que crecen sobre cuarcitas ( $0.44\pm0.12$ )<sup>b</sup> y serpentinitas ( $0.36\pm0.13$ )<sup>b</sup> que se diferencian muy significativamente ( $p<0.01$ ) de los sedimentos orgánicos ( $0.10\pm0.03$ )<sup>a</sup>.

En cuanto a la producción de fitolitos en raíces, los brezos de serpentinitas ( $0.58\pm0.27$ )<sup>b</sup> presentan valores significativamente más altos que los brezos de anfíbolitas ( $0.46\pm0.10$ )<sup>a</sup> y para ambas litologías la producción de fitolitos en raíces no se diferencia significativamente de las cuarcitas ( $0.35\pm0.17$ )<sup>ab</sup> y de los sedimentos orgánicos ( $0.33\pm0.23$ )<sup>ab</sup>.

Es decir, el contenido de fitolitos es mayor en flores, hojas y tallos de anfíbolitas de la mina de Touro y en las raíces procedentes de serpentinitas. Los valores más bajos se encuentran en cuarcitas y sedimentos orgánicos, siendo destacable que el promedio más bajo de fitolitos se localiza en los tallos de los sedimentos orgánicos.

A modo de síntesis se podría establecer que, los factores que condicionan la cantidad de fitolitos y su distribución en la planta son el primer lugar la posición filogenética (género, especie) que permite diferenciar claramente el género *Calluna* de los restantes; y en segundo lugar el material de partida del suelo.

Tabla V.4. Producción de fitolitos en brezales desarrollados sobre distintos materiales de partida de suelo en Galicia (media y desviación estándar)

	Serpentinitas (7)	Anfíbolitas (5)	Cuarcitas (7)	S. Orgánicos (2)
<b>Flores</b>	$0.58\pm0.21$ (10) <sup>a</sup>	$0.81\pm0.25$ (5) <sup>a</sup>	$0.48\pm0.14$ (41) <sup>a</sup>	
<b>Hojas</b>	$0.54\pm0.48$ (27) <sup>b</sup>	$1.25\pm0.89$ (30) <sup>c</sup>	$0.45\pm0.22$ (41) <sup>a</sup>	$0.48\pm0.18$ (7) <sup>a</sup>
<b>Tallos</b>	$0.36\pm0.13$ (40) <sup>b</sup>	$0.67\pm0.34$ (34) <sup>c</sup>	$0.44\pm0.12$ (42) <sup>b</sup>	$0.10\pm0.03$ (12) <sup>a</sup>
<b>Raíces</b>	$0.58\pm0.27$ (25) <sup>b</sup>	$0.46\pm0.10$ (29) <sup>a</sup>	$0.35\pm0.17$ (28) <sup>ab</sup>	$0.33\pm0.23$ (12) <sup>ab</sup>

Para cada material de partida del suelo entre paréntesis aparece el número de especies analizadas. En cada órgano el índice indica la pertenencia a un grupo significativamente diferente y entre paréntesis aparece el número de muestras analizadas para órgano en cada material de partida.

### V.3. IDENTIFICACIÓN MICROSCÓPICA Y ANÁLISIS ELEMENTAL DE FITOLITOS EN HOJAS DE *C. VULGARIS*

Hasta ahora se ha determinado la cantidad de fitolitos en todas las especies de brezos presentes en Galicia (excepto *E. tetralix*), cuánto produce cada órgano vegetal para cada especie y en cada tipo de suelo. A partir de ahora se identificarán por microscopía electrónica de barrido con emisión de campo ULTRA PLUS FESEM los fitolitos presentes en la hojas de *C. vulgaris* y se determinará su composición elemental por fluorescencia de rayos X (EMMA-XRF). Se selecciona *C. vulgaris* por ser la especie más ubicua de los brezales gallegos y la que más fitolitos contiene en sus hojas en todo tipo de suelos frente a las otras especies de brezo con las que está presente.

Se investigará como se distribuyen los elementos químicos que forman parte de su composición en la superficie del fitolito realizando mapas de distribución de elementos con microanálisis de Rayos X. Esta información sobre la composición y concentración elemental de fitolitos se relacionará con la concentración total del elemento en hoja y en suelo. Esta idea de que las propiedades del suelo condicionan la composición de los fitolitos ya está presente en varios trabajos (Hodson *et al.*, 1997; Sanger *et al.*, 1997; Neumann *et al.*, 1997; Bringezu *et al.*, 1999) pero prácticamente no existen estudios sobre la composición de fitolitos en brezos y los trabajos para su cuantificación también son escasos, encontrándose referencias para *C. vulgaris* en los trabajos de Bartoly & Wilding (1980) y Carnelli *et al.* (2001, 2002).

#### V.3.1. IDENTIFICACIÓN DE FITOLITOS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Los fitolitos se observan por microscopía electrónica obteniéndose imágenes entre 250 y 3000 aumentos. La Figura V.6 recoge las fotografías que muestran las morfologías poliédricas regulares de los tejidos silicificados de las hojas de *C. vulgaris* en Galicia.

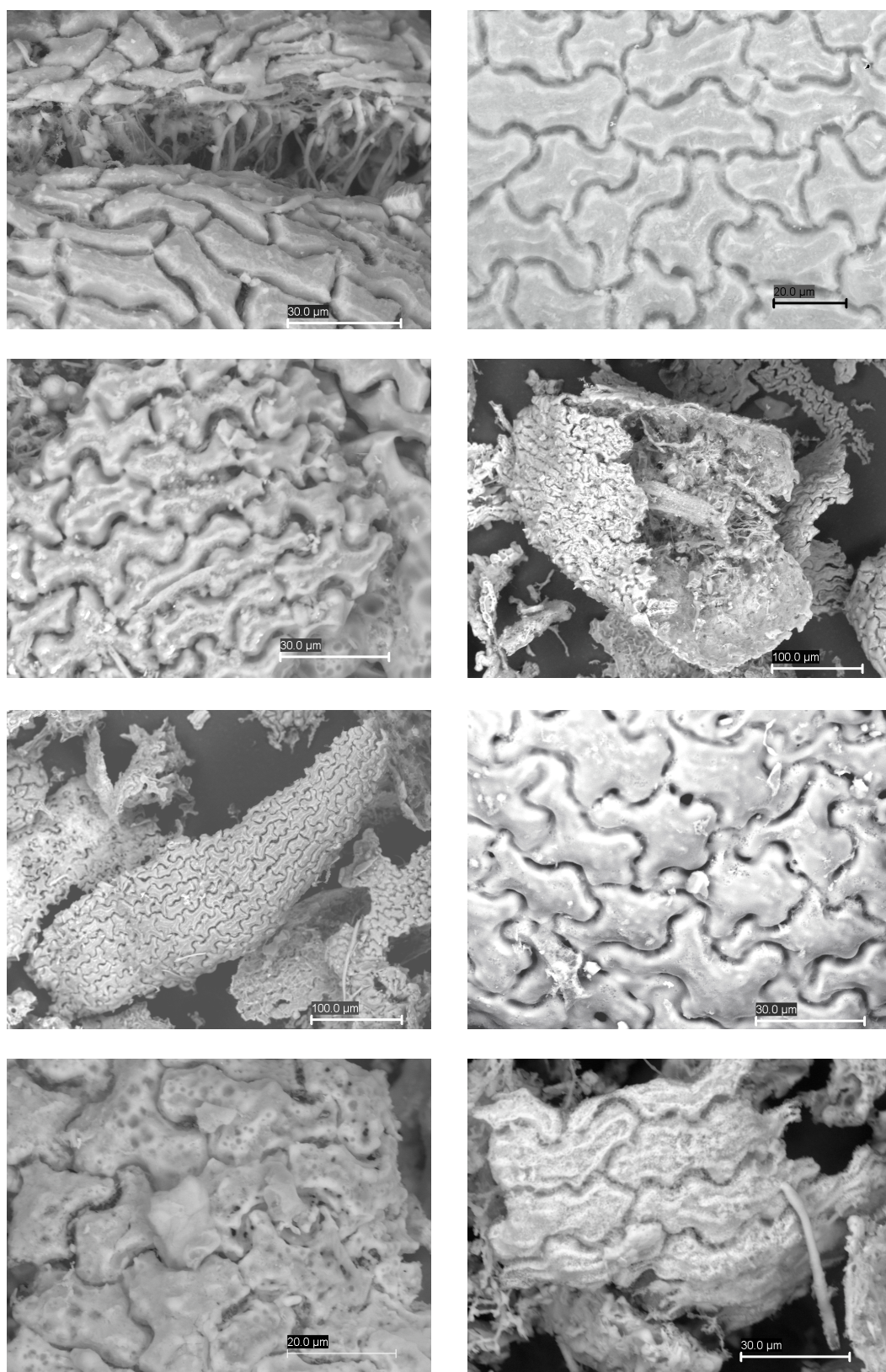


Figura V.6. Microfotografías de tejidos silicificados en hojas de *Calluna vulgaris* de Galicia observadas en un microscopio de barrido electrónico de emisión de campo ULTRA PLUS FESEM. Se fotografía la superficie de los fitolitos al vacío obteniéndose imágenes entre 250 y 1500 aumentos por medio de un detector de electrones retrodispersados (AsB), a una distancia de 8.5 mm, con una corriente de 461 pA, y un voltaje de aceleración de 20 kV. La escala gráfica aparece sobre cada fotografía.



V.3.2 COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LOS FITOLITOS EN HOJAS DE *C. VULGARIS*

Se determina la composición elemental de los fitolitos en las hojas de *C. vulgaris* (Tabla V.5). Considerados en conjunto tanto los elementos mayoritarios como los elementos traza, se ve que las mayores concentraciones se alcanzan en los fitolitos del Tecnosol espólico (A2) de la mina de Touro, con las concentraciones más elevadas de Si, Ca, K y Cu; y el valor más bajo de Al. El segundo lugar lo ocupa los fitolitos del Gleysol móllico (S5) de serpentinitas, que destacan por los valores más elevados en Mg, Ni y Cr (siendo los altos contenidos de estos elementos característicos de rocas serpentinizadas), y los más bajos de Si y Pb. En el Podzol álbico (Q3) del Pico Sacro destaca el elevado contenido en Zn y un porcentaje de Fe muy bajo. En los fitolitos del Histosol sáprico (SO1) del Xistral destacan los elevados contenidos de Al y Pb, resultando ser los más empobrecidos para la mayoría de los elementos analizados.

Tabla V.5. Análisis de fitolitos en hojas *Calluna vulgaris*

	S5	A2	Q3	SO1
Fitolitos en hojas (%)	1.59±0.07	2.54±0.25	0.92±0.43	0.60±0.08
Si (%)	33.21±1.20	38.62±1.00	37.84±1.10	36.65±0.90
Ca (%)	2.85±0.20	3.50±0.25	2.93±0.27	0.93±0.08
Mg (%)	1.84±0.14	1.62±0.17	1.75±0.15	0.66±0.05
K (%)	3.38±0.12	4.57±0.45	3.43±0.33	3.10±0.25
Al (%)	2.35±0.10	1.26±0.07	1.75±0.07	3.03±0.06
Fe (%)	1.88±0.04	1.93±0.04	1.32±0.04	1.90±0.04
Mn (%)	0.47±0.02	0.51±0.04	0.50±0.05	0.07±0.01
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	325±27	847±38	524±30	153±40
Ni (mg kg <sup>-1</sup> )	145±36	84±23	68±19	39±9
Cr (mg kg <sup>-1</sup> )	633±47	210±52	69±15	9±2
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	423±23	554±32	608±33	250±21
Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	19.7±2.0	25.0±3.0	35.4±4.0	69.5±6.5

S5= Gleysol móllico ; A2= Tecnosol espólico ; Q3= Podzol álbico ; SO1=Histosol sáprico  
% de fitolitos determinado por gravimetría y análisis elemental por EMMA-XRF.

La composición elemental determinada por FRX es coherente con los resultados obtenidos por medio de microanálisis de rayos X en microscopía electrónica de barrido, técnica que ha permitido realizar mapas de distribución de los elementos químicos que se encuentran en la superficie de los fitolitos foliares de *C. vulgaris* para cada uno de los suelos estudiados (Figuras V.7 a V.10). En estas imágenes destaca la distribución homogénea de la mayor parte de los elementos por toda la superficie del fitolito. La excepción la constituye el Al en Histosol sáprico (SO1) y Podzol álbico (Q3), donde se puede ver que éste aparece preferentemente concentrado en determinadas zonas (Figuras V.9 y V.10). Una observación similar se encuentra en relación con los recubrimientos de Al que a veces se encuentran sobre los fitolitos de acículas de coníferas formando una película sobre la superficie de los mismos y que los protegería de la degradación cuando son incorporados al suelo (Bartoli & Wilding, 1980; Raven, 1983). En efecto, en Q3 se aprecia una fina capa de mayor refringencia depositada sobre los poliedros de los fitolitos que está formada mayoritariamente por Al (Figura V.9).



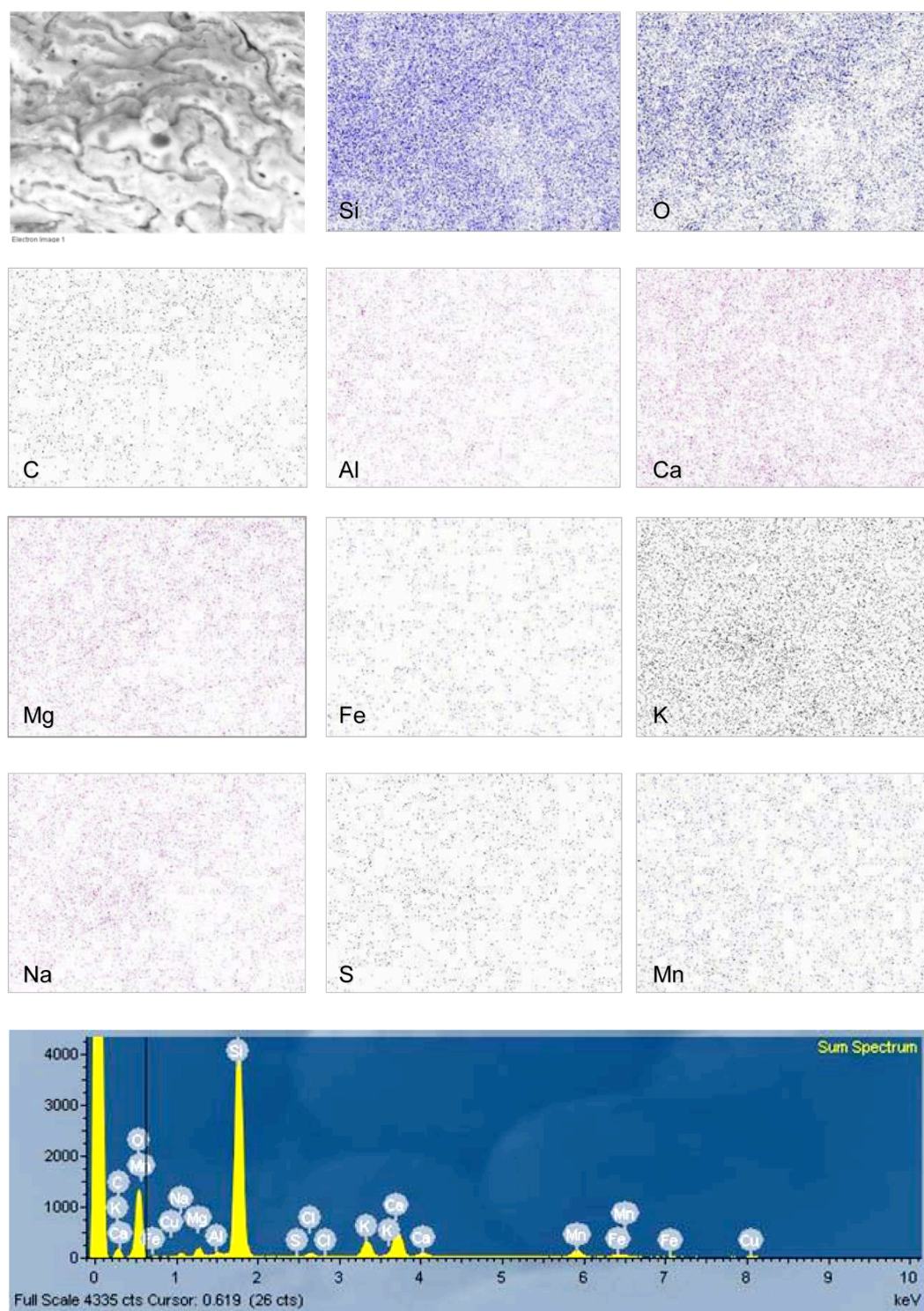


Figura V.7. Mapa de distribución de elementos químicos en fitolitos de hojas de *Calluna vulgaris* en un Tecnosol espólico de la mina de Touro (A2) utilizando microanálisis de energía dispersiva de rayos X (INCA-x-act) por microscopía electrónica de barrido con emisión de campo (FESEM). Arriba izquierda microfotografía de la sección que se ha analizado con 1500 aumentos y abajo el espectro promedio obtenido con un tiempo de exposición de 250 s.; en abscisas el rango espectral en KeV y en ordenadas el número de cuentas.

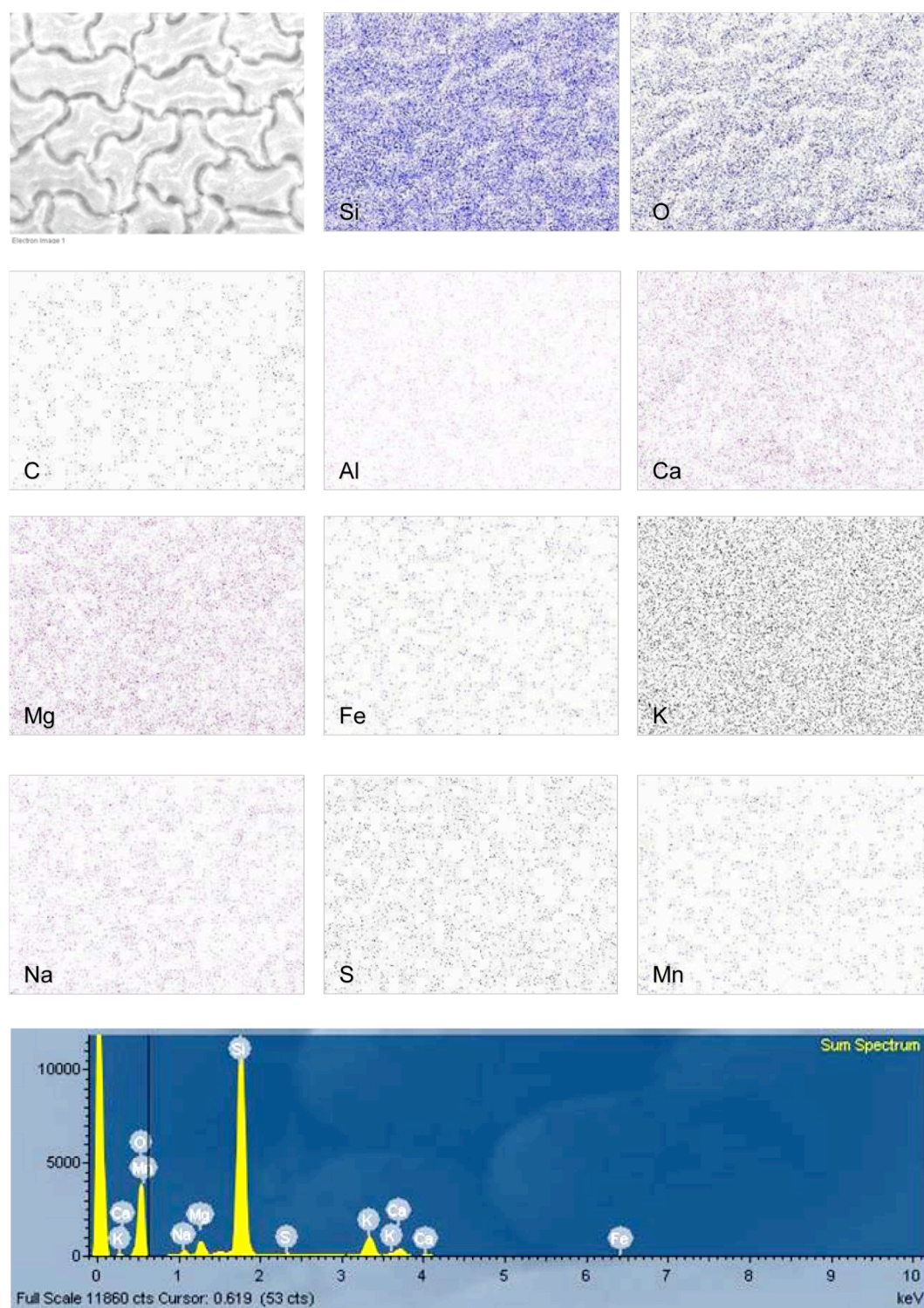


Figura V.8. Mapa de distribución de elementos químicos en fitolitos de hojas de *Calluna vulgaris* en el Gleysol mólico sobre serpentinitas de Melide (S5) utilizando microanálisis de energía dispersiva de rayos X por FESEM. Arriba izquierda microfotografía de la sección que se ha analizado con 1000 aumentos y abajo el espectro promedio obtenido con un tiempo de exposición de 250 s.; en abscisas se representa el rango espectral en KeV y en ordenadas el número de cuentas.



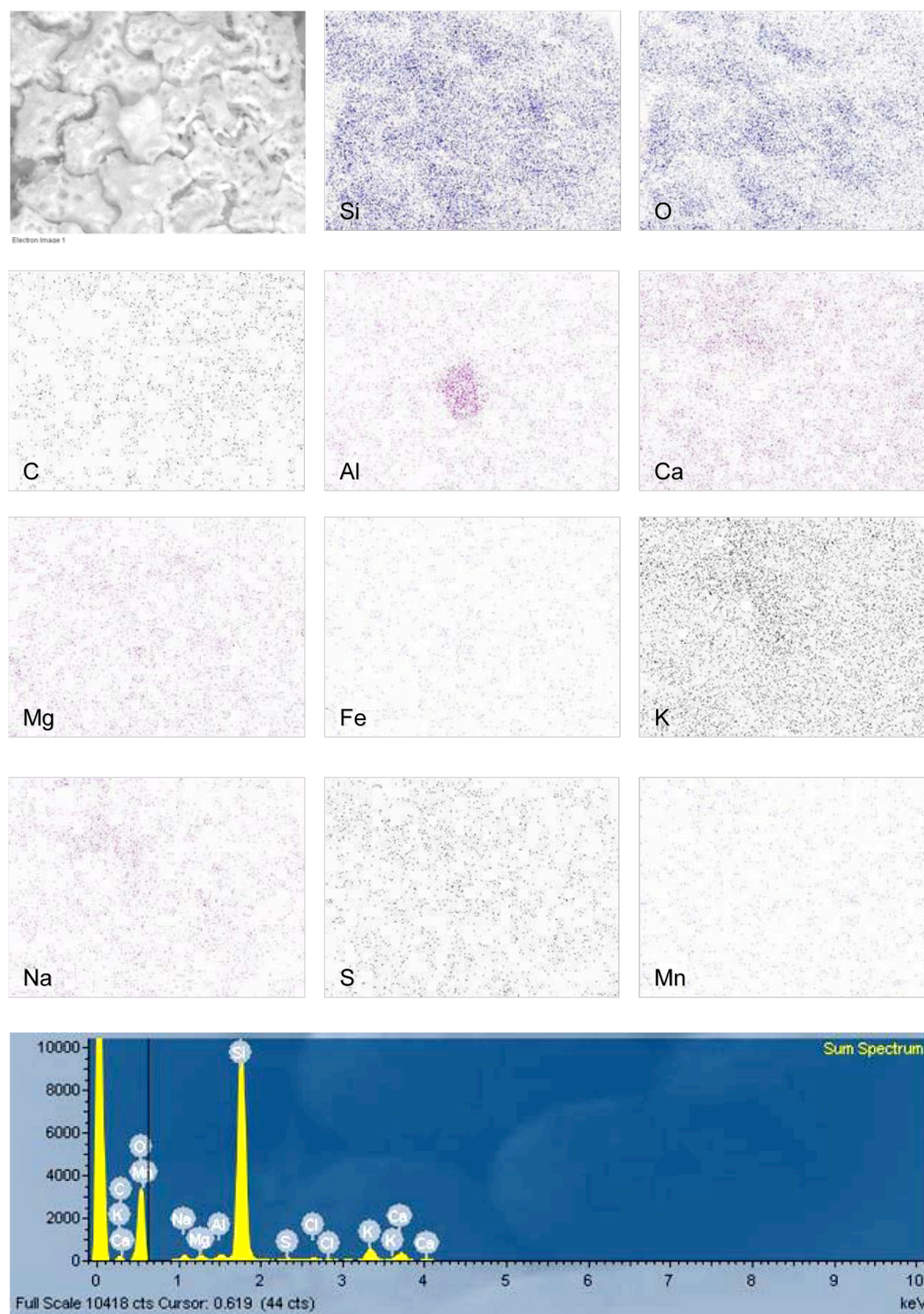


Figura V.9. Mapa de distribución de elementos químicos en fitolitos de hojas de *Calluna vulgaris* en el Podzol álbico sobre cuarcitas en el Pico Sacro (Q3) utilizando microanálisis de energía dispersiva de rayos X por FESEM. Arriba izquierda microfotografía de la sección que se ha analizado con 1500 aumentos y abajo el espectro promedio obtenido con un tiempo de exposición de 250 s.; en abscisas el rango espectral en KeV y en ordenadas el número de cuentas. Se observa un depósito de Al en la parte central del barrido que coincide visualmente con una zona de mayor refringencia.

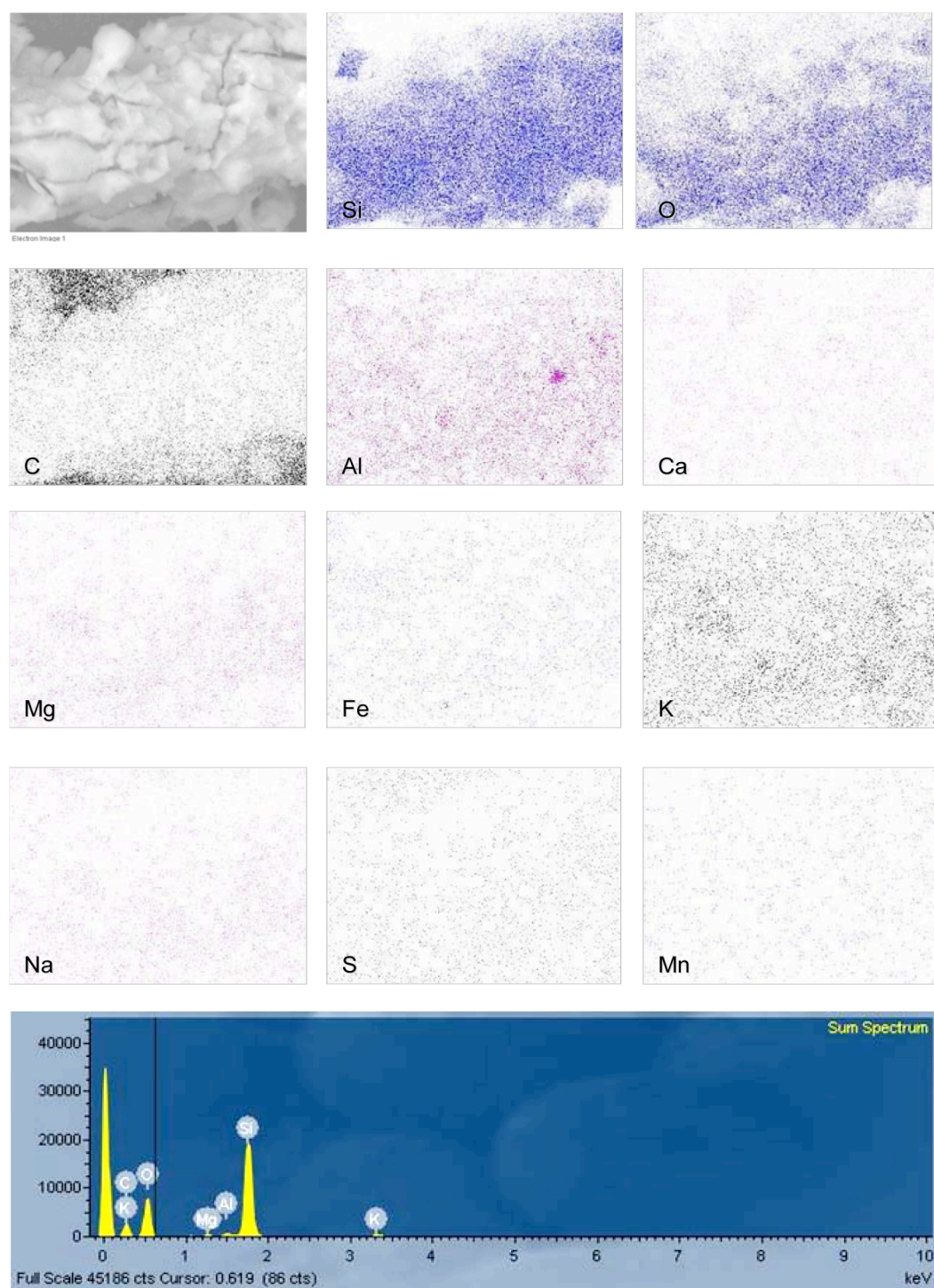


Figura V.10. Mapa de distribución de elementos químicos en fitolitos de hojas de *Calluna vulgaris* en un Histosol sáprico (SO1) de la turbera de Montouto (Serra do Xistral) utilizando microanálisis de energía dispersiva de rayos X por FESEM. Arriba izquierda microfotografía de la sección que se ha analizado con 2000 aumentos y abajo el espectro promedio obtenido con un tiempo de exposición de 250 s.; en abscisas se representa el rango espectral en KeV y en ordenadas el número de cuentas.

Se comprueba que las secuencias obtenidas en la cartografía de elementos en microscopía electrónica son acordes con los resultados obtenidos por FRX: las mayores densidades atómicas se encuentran en A2 (Figura V.7) coincidiendo con las mayores concentraciones determinadas por FRX (Tabla V.5.) para el Si ( $38.62 \pm 1.20\%$ ), Ca ( $3.50 \pm 0.25\%$ ) y Fe ( $1.93 \pm 0.04\%$ ); en S5 (Figura V.8) para el Mg ( $1.84 \pm 0.14\%$ ); en SO1 (Figura V.10) se encuentra la mayor densidad para el Al ( $3.03 \pm 0.06\%$ ) y la menor para el Ca ( $0.93 \pm 0.08\%$ ), Mg ( $0.66 \pm 0.05\%$ ) y Mn ( $0.07 \pm 0.01\%$ ). En Q3 (Figura V.9) la menor densidad es para el Fe ( $1.32 \pm 0.04\%$ ).

Esta información también se puede abordar considerando conjuntamente la cantidad de fitolitos que produce la planta y la composición elemental de los mismos. Para ello la concentración del fitolito (en g de elemento  $100 \text{ g}^{-1}$  para elementos mayoritarios y mg de elemento  $\text{kg}^{-1}$  para elementos traza) se multiplica por la producción de fitolitos de *C. vulgaris* para cada suelo (en g de Fitolito  $100 \text{ g}^{-1}$  hoja). Los resultados quedan expresado en cantidad de elemento del fitolito referido a peso de hoja seca a  $105^\circ\text{C}$  (en g de elemento en el fitolito  $100 \text{ g}^{-1}$  hoja para elementos mayoritarios y mg de elemento en el fitolito  $\text{kg}^{-1}$  hoja para elementos traza). Así por ejemplo, la concentración media de Ca en los fitolitos de *C. vulgaris* en S5 es de ( $2.85 \pm 0.20\%$ ). Ésta se puede referir a peso seco de hoja teniendo en cuenta que por cada 100 g de hoja hay un promedio de 1.59 g de fitolitos, resultando por tanto:

$2.85 \text{ g Ca}/100 \text{ g fitolitos} * 1.59 \text{ g fitolitos}/100 \text{ g hoja} = 0.045 \text{ g de Ca "secuestrado" en el fitolito por cada 100 g de hoja.}$

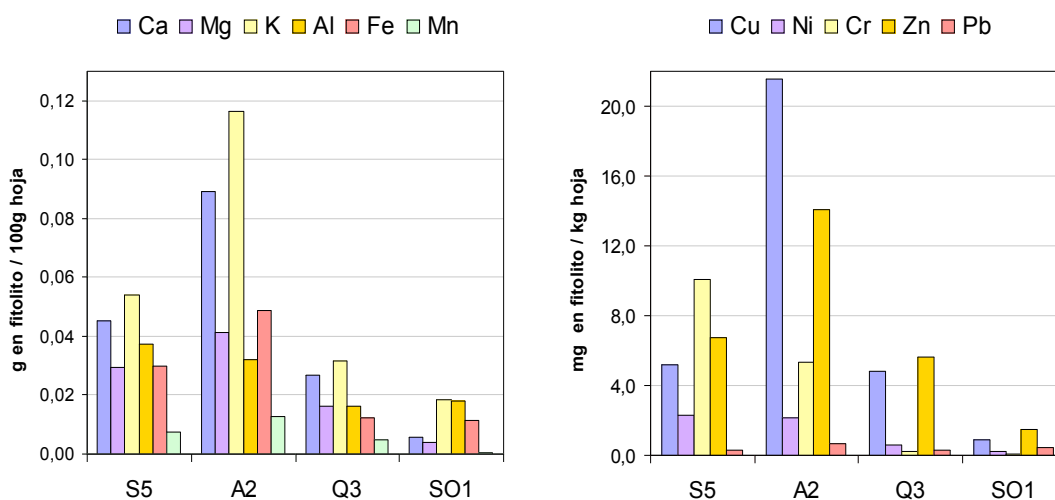


Figura V.11. Concentración elemental en fitolitos referida al peso seco de hoja.

En la Figura V.11 se representa el análisis elemental de los fitolitos referido a peso seco de hoja para todos los elementos analizados, apreciándose que, tanto para mayoritarios como para los elementos trazas la composición es diferente para cada suelo y sigue un patrón cuantitativo que aumenta en la secuencia  $\text{SO1} < \text{Q3} < \text{S5} < \text{A2}$ . Esta gráfica permite ver en conjunto una clara relación entre la concentración de elemento en el fitolito y la composición del suelo, confirmando

los resultados mostrados hasta el momento. Así, tanto para elementos mayoritarios como para traza se ve que las mayores concentraciones se alcanzan en los fitolitos de la mina de Touro (A2), el segundo lugar lo ocupan las rocas ultrabásicas (S5), que solo superan al anterior en el contenido de Al, Cr y Ni. Las menores concentraciones están en Q3 y SO1.

Otra forma de interpretar los resultados es calcular la proporción de elemento total de la hoja que está secuestrada en el fitolito (Tabla V.6); se emplea el término de secuestro o inmovilización del elemento en el fitolito, ya que después de que la sílice biogénica se deposita en los tejidos de la planta, no se moviliza ni está disponible para translocarse a otras partes de la misma (Raven, 1983; Epstein, 1994). Para ello se necesita conocer la concentración elemental de las hojas de *C. vulgaris* en los distintos brezales considerados (Tabla V.7). Así, por ejemplo en S5 la concentración de Ca total en hoja es de 0.345% y el fitolito tiene 0.045 g de Ca por cada 100 g de hoja resultando:

$$[0.045/0.345] * 100 = 13.04\% \text{ del Ca total en hoja está en el fitolito}$$

Tabla V.6. Proporción del contenido total del elemento de la hoja que está en los fitolitos

	S5	A2	Q3	SO1
Ca (%)	13.1	29.4	5.8	2.1
Mg (%)	16.9	29.8	9.3	3.2
K (%)	16.1	28.4	3.7	7.7
Al (%)	74.9	76.2	59.6	73.0
Fe (%)	85.0	90.6	71.3	71.7
Mn (%)	16.9	8.5	6.4	1.8
Cu (%)	84.7	91.6	69.9	14.4
Ni (%)	6.2	20.7	8.1	7.0
Cr (%)	26.8	76.6	24.9	5.4
Zn (%)	52.3	60.0	33.2	5.6
Pb (%)	39.2	70.6	27.1	21.9

#### CANTIDAD DE FITOLITOS Y CONCENTRACIÓN DE SÍLICE

La mayor producción de fitolitos se encuentra en el Tecnosol espólico ( $2.54 \pm 0.25\%$ ), el brezal de la mina de Touro, fitolitos que además presentan la mayor concentración de sílice opalina con un 82.71%. El segundo lugar en producción de fitolitos lo ocupa el Gleysol móllico ( $1.59 \pm 0.07\%$ ), con la menor concentración de sílice opalina con un 71.14%. Las producciones más bajas de fitolitos están en el Podzol álbico ( $0.92 \pm 0.43\%$ ) y en el histosol sáprico ( $0.60 \pm 0.08\%$ ), con contenidos medios de 81.0% y 78.4% de  $\text{SiO}_2$  respectivamente (Tabla V.5). Es decir, existen claras diferencias, tanto en la cantidad como en el porcentaje de Si en los fitolitos que produce *C. vulgaris* en sus hojas, dependiendo del brezal estudiado.



Tabla V.7. Análisis foliar promedio de *C. vulgaris*

	S5	A2	Q3	SO1
Ca (%)	0.345	0.303	0.462	0.267
Mg (%)	0.175	0.138	0.173	0.125
K (%)	0.334	0.410	0.413	0.242
Al (%)	0.050	0.042	0.027	0.025
Fe (%)	0.035	0.054	0.017	0.016
Mn (%)	0.044	0.153	0.073	0.025
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	6.1	23.5	6.9	6.4
Ni (mg kg <sup>-1</sup> )	37.6	10.3	7.8	3.3
Cr (mg kg <sup>-1</sup> )	37.3	6.7	1.0	1.0
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	12.9	23.5	16.8	26.7
Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	0.8	0.9	1.2	1.9

S5= Gleysol mólico ; A2= Tecnosol espólico ; Q3= Podzol álbico ; SO1=Histosol sáprico.

Después de la especie la disponibilidad de Si sería el segundo factor de peso que determina la producción de fitolitos en la planta (Rosen & Weiner, 1994; Piperno, 1998; Hodson *et al.*; 2005; Zurro; 2006). La solubilidad de Si en agua depende de varios factores: temperatura, pH (se incrementa a partir de pH 9), presencia de Al, Fe y aniones orgánicos (Yariv & Cross, 1979). De entrada, cabría esperar que la disolución de equilibrio en los suelos esté sobresaturada respecto al cuarzo (el mineral de silicio más abundante y más estable, por tanto el menos soluble). Así las aguas superficiales están teóricamente en equilibrio termodinámico con el cuarzo, pero no es sólo este equilibrio el que interviene en la composición del agua en contacto con los minerales, son las cinéticas de alteración/disolución y precipitación de los minerales presentes las que juegan un papel determinante. La cinética de la precipitación del cuarzo es muy lenta (Siffert, 1967; Brady & Walter, 1990; Dove & Rimstidt, 1994), pero las concentraciones relativas de H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> pueden aumentar en la disolución si su aporte proviene de otras fuentes más solubles que el cuarzo (menos estables termodinámicamente hablando). En esta situación la sílice que se libera no será “consumida” por la precipitación del cuarzo y la concentración de Si en disolución aumentará hasta que se alcance el equilibrio con el mineral fuente, que en ese momento dejará de disolverse (Delmas *et al.*, 1982 ; Dove 1995). Si la fuente de sílice en la disolución del suelo proviene por ejemplo, de la disolución de los minerales de la arcilla, o de la disolución de un especie de SiO<sub>2</sub> más soluble que el cuarzo (ópalo o cristobalita), o incluso de la disolución de los fitolitos presentes en el suelo; entonces las concentraciones de Si en la disolución podrían alcanzar 5 veces o más la solubilidad del cuarzo, siempre que el drenaje y por tanto, la exportación de la sílice en el sistema, esté limitada (Thiry, com. pers.).

La gran mayoría de las disoluciones del suelo y las aguas freáticas del mundo (salvo en países tropicales húmedos, donde los suelos son muy lavados) están sobresaturados con relación al cuarzo, con una media de 18 mg l<sup>-1</sup> de SiO<sub>2</sub> frente al equilibrio con el cuarzo que es de 4 mg l<sup>-1</sup> (Garrrels & Christ, 1965). No obstante, hay que destacar que en los suelos mineros que contienen sulfuros, caso del brezal de la mina de Touro (A2), los pH muy ácidos generados por la oxidación de los sulfuros atacan los silicatos y pueden generar elevadas concentraciones de Si en solución,

frecuentemente entre 20 y 30 mg l<sup>-1</sup>. (Thiry *et al.*, 2002; Schmitt *et al.*, 2002). Por tanto, en medios con una alteración muy intensa, como en suelos de mina, el proceso de acidolisis hace que la disolución del Si sea más rápida que su precipitación y esto explicaría el mayor contenido medio en SiO<sub>2</sub> (82.7±2.1%) y sobre todo, la mayor producción de fitolitos en *C. vulgaris* de Touro.

El Gleysol móllico de rocas ultrabásicas (S5) se sitúa en una depresión en fondo de valle donde se acumula el agua y predominan los materiales finos. En estas condiciones de drenaje limitado la exportación de Si fuera del sistema está impedida; el tiempo de residencia del Si resulta ser mayor y podría facilitar una mayor producción de fitolitos, aún con menores concentraciones de sílice (71.1±2.6%).

En Podzoles domina la acidocomplexolisis caracterizada por la eluviación de Al y Fe, pero también de Si, de manera que el Si en forma soluble puede ser eliminado del perfil hacia aguas superficiales profundas (Yariv & Cross, 1979). Además las condiciones de fuerte drenaje hacen que los tiempos de residencia sean bajos y aunque se alcancen elevadas concentraciones de SiO<sub>2</sub> en fitolitos (81.0±2.4%) la producción de éstos en planta es mucho más baja (0.92±0.43%).

En cuanto al Histosol sáprico (SO1) los tiempos de residencia son elevados y al tratarse de un suelo orgánico con contenidos muy bajos de Si total en el suelo (8.8 % SiO<sub>2</sub>) se obtienen las producciones medias de fitolitos en hojas de *C. vulgaris* más bajas (0.60±0.08%) de todos los suelos estudiados.

Debe tenerse en cuenta además, que la absorción de la sílice por las plantas no responde tan sólo a las leyes de la termodinámica y a la cinética mineral, ya que, con la intervención de los organismos vivos, vegetales o animales, otros procesos entran en juego aumentando la complejidad del sistema. Los seres vivos son capaces de concentrar elementos químicos, aunque su concentración externa esté por debajo de los equilibrios termodinámicos. Los ejemplos típicos son las conchas de moluscos que se forman aunque las aguas no estén sobresaturadas en calcita o los dientes de los vertebrados aunque las aguas estén muy por debajo de la saturación del fósforo frente al apatito. De forma similar, las plantas son particularmente capaces de segregar fitolitos de ópalo, aunque la disolución del suelo esté muy por debajo del equilibrio de la sílice amorfa (Thiry, com. pers.).

A continuación se describen pormenorizadamente cada uno de los elementos cuantificados en los fitolitos foliares de *C. vulgaris* estableciendo las posibles relaciones entre las concentraciones correspondientes en fitolito (Tabla V.5), hoja (Tabla V.7) y suelo (Tabla V.8), por medio de matrices de correlación. Se han establecido las relaciones entre la concentración elemental de fitolitos referido a peso de hoja, con los contenidos totales de Fe y Al en el suelo, por ser los elementos más mayoritarios después del Si y por su papel en la química del suelo.



Tabla V.8. Composición química de los epidedones en los suelos de brezal: media y desviación estándar

	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	pH (NaF)	C (%)	N (%)	C/N	P Olsen (mg kg <sup>-1</sup> )
S5	5.79±0.01	5.30±0.03	8.27±0.04	2.52±0.13	0.16±0.01	15.7±2.2	2.66±0.13
A2	3.97±0.03	3.89±0.18	8.00±0.13	1.38±0.04	0.09±0.01	13.8±0.5	1.63±0.04
Q3	4.25±0.03	3.11±0.04	6.69±0.06	5.50±0.25	0.25±0.01	21.6±0.4	3.45±0.08
SO1	4.05±0.06	3.15±0.03	7.44±0.06	41.12±2.11	2.11±0.20	19.5±1.3	5.62±0.54

	Ca <sub>e</sub> <sup>+2</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	Mg <sub>e</sub> <sup>+2</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	Na <sub>e</sub> <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	K <sub>e</sub> <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	Al <sub>e</sub> <sup>+3</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	CIC <sub>e</sub> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	SB <sub>e</sub> (%)
S5	2.11±0.16	3.67±0.12	0.20±0.02	0.14±0.01	0.04±0.01	6.20±0.31	98.4±0.1
A2	1.22±0.02	0.51±0.01	0.15±0.01	0.13±0.01	2.47±0.07	4.72±0.11	42.5±0.3
Q3	0.36±0.03	0.31±0.01	0.21±0.02	0.13±0.01	3.83±0.14	6.81±0.18	14.9±0.6
SO1	4.19±0.41	3.28±0.19	0.72±0.07	0.48±0.05	2.93±0.10	12.9±0.75	67.7±1.7

	SAI <sub>e</sub> (%)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Si (%)	Al (%)	Fe (%)
S5	0.7±0.2	3.45±0.24	1.50±0.02	0.47±0.02	18.01±0.22	4.87±0.14	9.73±0.31
A2	52.3±0.2	5.71±0.36	1.36±0.06	0.85±0.06	18.65±0.49	5.08±0.10	10.76±0.37
Q3	56.2±0.5	0.07±0.01	0.51±0.05	0.29±0.03	30.77±0.70	4.05±0.27	0.28±0.02
SO1	22.7±2.1	0.11±0.01	0.04±0.00	0.12±0.01	4.13±0.13	0.98±0.04	0.47±0.03

	Ti (%)	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	Ni (mg kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg kg <sup>-1</sup> )
S5	1.01±0.08	2243±95	13.8±1.3	1092±54	6028±88	72.3±0.7	9.3±0.5
A2	0.93±0.05	2068±74	1083±53	62.4±2.5	576±33	212.2±4.8	10.7±0.3
Q3	0.35±0.01	45±1	5.2±0.1	4.1±0.1	25±3	15.0±0.7	9.7±1.2
SO1	0.06±0.01	28±1	10.7±1.1	10.6±2.9	23±2	122.0±2.8	42.4±3.3

P asimilable (Olsen); Capacidad de Intercambio catiónico efectiva de los suelos (CICe), suma de cationes básicos (SB<sub>e</sub>) intercambiables: Ca+Mg+Na+K extraídos con NH<sub>4</sub>Cl y suma de cationes ácidos (SCA) intercambiables: Al+H extraídos con KCl.; SAI<sub>e</sub>= % saturación de Al del complejo de cambio. Concentración de elementos totales.

#### CONCENTRACIÓN DE Ca, Mg Y K

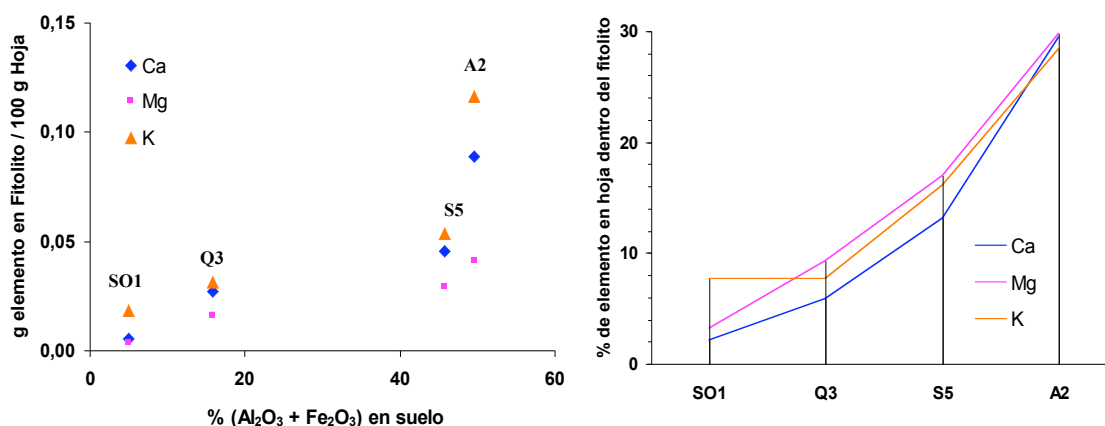


Figura V.12. A la izquierda en abscisas se representa el contenido total de Al y Fe del suelo expresado como óxido frente a la concentración de Ca, Mg y K en el fitolito referida a de hoja. A la derecha se representa la proporción del elemento total de la hoja que está en el fitolito para los distintos suelos estudiados.

Se observa que en el conjunto de los brezales estudiados a medida que aumentan las concentraciones de Al y Fe totales en el suelo se incrementan también las concentraciones de Ca, Mg y K en los fitolitos (Tabla V.9 y Figura 12 izqda.). En la misma figura a la derecha aparece representado el porcentaje de Ca, Mg y K inmovilizado en los fitolitos de *C. vulgaris* en cada uno de los suelos estudiados. Se encuentra que entre un 2% y un 30% de Ca y Mg totales de la hoja se localizan en el fitolito. En el Histosol sáprico (SO1) 2 y 3%, en el Podzol álbico (Q3) 6 y 9%, en el Gleysol móllico (S5) con un 15% y en el Tecnosol espólico (A2) con un 30% del contenido total de Ca y Mg de la hoja en el fitolito, respectivamente. Para el K estos porcentajes se sitúan entre el 8% y el 28%, con un 8% para SO1 y Q3, un 16% para S5 y un 28% para A2. Es decir, para estos macronutrientes la proporción de elemento que está en el fitolito frente al total de la hoja siempre está por debajo del 30% y en los suelos más oligotrofos constituye menos del 10% (SO1 y Q3).

Tabla V.9. Concentraciones de Ca, Mg y K en fitolitos, hojas y suelos de *Calluna vulgaris*

	Ca Fitolito (g/100g hoja)	Ca Hoja (%)	Ca Suelo (%)	Mg Fitolito (g/100g hoja)	Mg Hoja (%)	Mg Suelo (%)	K Fitolito (g/100g hoja)	K Hoja (%)	K Suelo (%)
S5	0,045	0.345	3.45	0,029	0.175	1.50	0,054	0.334	0.47
A2	0,089	0.303	5.71	0,041	0.138	1.36	0,116	0.410	0.85
Q3	0,027	0.462	0.07	0,016	0.173	0.51	0,032	0.413	0.29
SO1	0,006	0.267	0.11	0,004	0.125	0.04	0,019	0.242	0.12

S5= Gleysol en Melide ; A2= Tecnosol en Touro ; Q3= Podzol en Pico Sacro ; SO1=Histosol en Montouto.

En la Tabla V.10 se recogen los coeficientes de correlación de Pearson para los contenidos de Ca, Mg y K entre fitolito, hoja y suelo. No se han encontrado correlaciones significativas entre las concentraciones de estos elementos en hoja y en fitolitos. Sin embargo, si existe correlación entre el contenido total en el suelo y la concentración en el fitolito. Así se encuentra una correlación significativa para el Ca ( $r=0.948$ ;  $p<0.05$ ) y el Mg ( $r=0.924$ ;  $p<0.10$ ) entre la concentración de estos elementos en el fitolito referida a peso seco de hoja y el contenido total en el suelo. Para el K la correlación entre la concentración total en el suelo y la concentración absoluta en fitolito ( $r=0.950$ ) es significativa ( $p<0.05$ ) y muy significativa ( $p<0.01$ ) para la concentración del fitolito referido a peso seco de hoja ( $r=0.991$ ).

Tabla V.10. Coeficientes de correlación de Pearson para los contenidos en fitolito, hoja y suelo

	g Ca 100g <sup>-1</sup> hoja	g Ca 100g <sup>-1</sup> suelo
g Ca 100g <sup>-1</sup> fitolito ssuelosuelo-1	0.457	0.681
g Ca en Fitolito 100g <sup>-1</sup> hoja kg <sup>-1</sup> suelo	0.000	<b>0.948*</b>
	g Mg 100g <sup>-1</sup>	g Mg 100g <sup>-1</sup> suelo
g Mg 100g <sup>-1</sup> fitolito ssuelosuelo-1	0.832	0.767
g Mg en Fitolito 100g <sup>-1</sup> hoja	0.207	<b>0.924</b>
	g K 100g <sup>-1</sup> hoja	g K 100g <sup>-1</sup> suelo
g K 100g <sup>-1</sup> fitolito ssuelosuelo-1	0.669	<b>0.950*</b>
g K en Fitolito 100g <sup>-1</sup> hoja	0.587	<b>0.991**</b>

Las correlaciones significativas se señalan en negrita ( $p < 0.10$ ), con un asterisco si ( $p < 0.05$ ) y con dos asteriscos si éstas son muy significativa ( $p < 0.01$ )

### CONCENTRACIÓN DE Al, Fe Y Mn

En la Figura V.10 se observa como a medida que aumenta la concentración de Al y Fe total en el suelo se incrementa también la concentración de Fe y Mn en los fitolitos. Para el Al esto no se cumple en las muestras que tienen las concentraciones más bajas de Al en hoja secuestrado en el fitolito: SO1 y Q3, con 0.018 y 0.016 %, respectivamente. Además, los fitolitos concentran más del 60% del Al y del Fe totales de las hojas de *C. vulgaris*, entre un 60-75% del Al y entre un 60-85% del Fe. La acumulación promedio es de un 71% para el Al y un 80% para el Fe; estos resultados son acordes con los descritos por Bartoli & Wilding (1980) que encuentran porcentajes entre el 60 y el 95% del Al de las hojas en fitolitos.

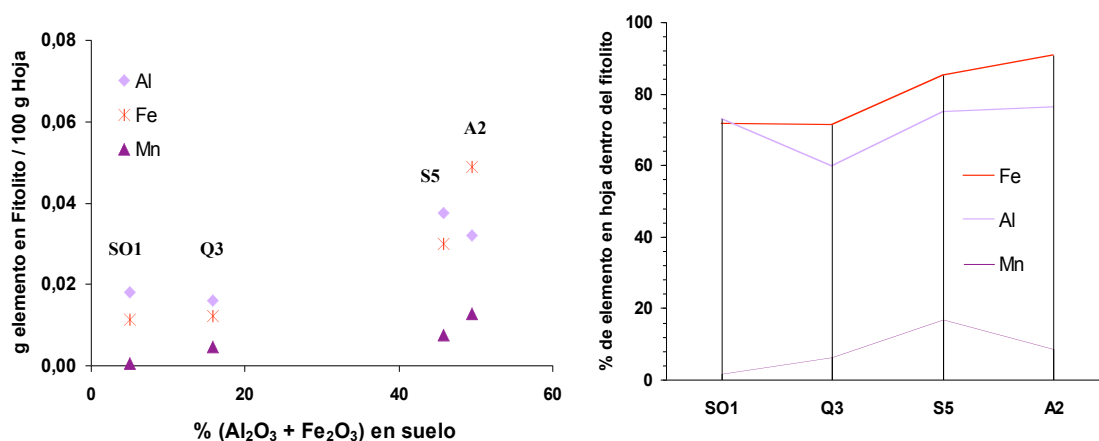


Figura V.13. A la izquierda en abscisas se representa el contenido total de Al y Fe del suelo expresado como óxido frente a la concentración de Al, Fe y Mn en el fitolito referida a peso seco de hoja. A la derecha se representa la proporción del elemento total de la hoja que está en el fitolito.

Carnelli *et al.* (2002; 2004) realizan análisis semicuantitativos con microsonda de rayos X por SEM en los fitolitos de hojas y brotes verdes de *C. vulgaris* en suelos alpinos encontrando que éstos contienen Al en el 95% de los casos en comparación las gramíneas sólo contienen Al en un 2% de los casos. En el presente estudio el Al y el Fe forman parte siempre de la composición de

los fitolitos en concentraciones importantes que en promedio varían entre 1.3 y 3.1% para el Al y 1.3 y 1.9% para el Fe. Estos resultados coinciden con los encontrados por Bartoli & Wilding (1980) en fitolitos de *C. vulgaris* en un Podzol de los Vosges franceses, que resultan ser de 2.1% de Al y 1.4% de Fe.

Tabla V.11. Concentraciones de Al, Fe y Mn en fitolitos, hojas y suelos de *Calluna vulgaris*

	Al Fitolito (g/100g hoja)	Al Hoja (%)	Al Suelo (%)	Fe Fitolito (g/100g hoja)	Fe Hoja (%)	Fe Suelo (%)	Mn Fitolito (mg/kg hoja)	Mn Hoja (mg kg <sup>-1</sup> )	Mn Suelo (mg kg <sup>-1</sup> )
S5	0,037	0.050	4.87	0,030	0.035	9.73	80	445	2243
A2	0,032	0.042	5.08	0,049	0.054	10.76	130	1530	2068
Q3	0,016	0.027	4.05	0,012	0.017	0.28	50	726	45
SO1	0,018	0.025	0.98	0,011	0.016	0.47	30	245	28

S5= Gleysol en Melide ; A2= Tecnosol en Touro ; Q3= Podzol en Pico Sacro ; SO1=Histosol en Montouto.

Masunaga *et al.* (1988) encuentran correlaciones positivas entre las concentraciones de Al y Si en fitolitos de hojas en un bosque tropical de Indonesia, de manera que las plantas que acumulan Al también acumulan Si. Por otro lado en el presente estudio se encuentra que la relación Si/Al en el fitolito está altamente correlacionada ( $p < 0.05$ ) con la relación Si/Al en hoja ( $r = 0.961$ ) para los 4 brezales estudiados.

La solubilidad del ópalo biogénico sería equiparable a la del ópalo geológico, pero ésta es menor debida a la presencia de una pátina orgánica y la adsorción del Al (Yariv & Cross, 1979), siendo la velocidad de disolución de los fitolitos comparable a la biodegradación de la materia orgánica, de manera que en los suelos con baja actividad biológica los fitolitos se conservan mejor (Bartoli & Selmi, 1977). Según Bartoli & Wilding (1980) entre las propiedades intrínsecas que favorecen la conservación de los fitolitos están su menor grado de hidratación y encuentran una relación directa entre la relación Si/Al de los fitolitos y su capacidad de disolución. Su relación Si/Al en fitolitos de *C. vulgaris* es de 16 y resulta un valor intermedio entre los obtenidos en la presente investigación, que oscilan entre 12 y 31.

Cuando hay Al en disolución y existe poco Si disponible la relación Al/Si en los fitolitos aumenta de manera que se encuentran relaciones de 0.03-0.04 para A2 y Q3, que se duplican hasta el 0.08 para el brezal de turbera (SO1). Para el Fe se encuentra un comportamiento similar pues la relación Fe/Si rinde valores de 0.03 en A2 y Q3, y de 0.05-0.06 en SO1 y S5, respectivamente.

Sanger & Hodson (1997) encuentran siempre ratios Al/Si menores de 1 y tan solo 24 horas después de someter coníferas a una exposición con Al encuentran coprecipitación de Al y Si en las vacuolas de las células corticales de la raíz, pero en los fitolitos siempre es mayoritario el Si.

La distribución de Al, Ca y Si en los fitolitos varía con las especies y así en coníferas el Si permite un mayor paso de Al hacia el tejido aéreo sin evidencias de toxicidad; estos elementos aparecen siempre depositados juntos, lo que constituiría un mecanismo detoxificador para secuestrar el Al

que pudiera resultarle tóxico a la planta (Hodson & Evans, 1995; Sangster *et al.*, 1997; Cocker *et al.*, 1998; Hodson & Sanger, 1997; 1999).

Otros trabajos apuntan la posibilidad de interacciones entre elementos que se quedan reflejadas en la composición de los fitolitos o que al menos ayudan a su comprensión: Sanger *et al.* (2009) estudian los tejidos de *Tsuga canadensis* encontrando que las concentraciones de Si, Ca y Al aumentan con la edad, alcanzándose los valores más elevados en los fitolitos de las acículas más viejas. En el presente estudio se ha encontrado una correlación significativa ( $r=0.973$ ;  $p<0.05$ ) entre el contenido de Ca en el fitolito y la concentración de Al total en el suelo. Esto podría estar en relación con el papel protector del Ca frente al Al, ya que en gimnospermas la toxicidad por Al está inducida por la deficiencia de Ca y Mg y la relación molar Ca/Al en acículas de coníferas es un indicador de toxicidad por estrés (Hodson & Sanger, 1999). Esto mismo podría estar ocurriendo en los brezos, especialistas en vivir en suelos ácidos con elevadas concentraciones de Al disponible en muchos casos, de manera que el Al y el Ca podrían coprecipitar en los fitolitos. Echlin (1998) encuentra en maíz el Al precipitado en la epidermis de la pared celular asociado a elevadas concentraciones de Si y Mg. Este autor plantea que el Al podría ser secuestrado en forma de silicato Al-Mg como piropro o cordierita; en la presente investigación se encuentra una correlación significativa ( $p<0.10$ ) entre la concentración de Mg en el fitolito referida al peso seco de hoja de *C. vulgaris* y el Al ( $r=0.895$ ) total del suelo. La proporción de Mn foliar inmovilizado en los fitolitos es baja en todos los casos (5% para SO1, 8% en Q3, 10% en A2 y 18% en S5).

En la Tabla V.12 pueden observarse los coeficientes de correlación de Pearson para los contenidos de Al, Fe y Mn entre fitolito, hoja y suelo. Así para Al se encuentra una correlación muy significativa ( $r=0.987$ ;  $p<0.01$ ) entre la concentración en el fitolito y el contenido total en hoja. La correlación no resulta ser significativa con los contenidos de Al total en el suelo que, como se acaba de ver, sí está correlacionado con las concentraciones de Ca y Mg en los fitolitos.

Para el Fe se encuentra una correlación significativa ( $r=0.928$ ;  $p<0.10$ ) entre la concentración en el fitolito referido a peso seco de hoja y el contenido total en el suelo y en cuanto al Mn las correlaciones no son significativas en ningún caso.

Tabla V.12. Coeficientes de correlación de Pearson entre los contenidos en fitolito, hoja y suelo

	g Al 100g <sup>-1</sup> hoja	g Al 100g <sup>-1</sup> suelo
g Al 100g <sup>-1</sup> fitolito	0.311	0.810
g Al en Fitolito 100g <sup>-1</sup> hoja	<b>0.987**</b>	0.666
	g Fe 100g <sup>-1</sup> hoja	g Fe 100g <sup>-1</sup> suelo
g Fe 100g <sup>-1</sup> fitolito	0.517	0.596
g Fe en Fitolito 100g <sup>-1</sup> hoja	0.318	<b>0.928</b>
	g Mn 100g <sup>-1</sup>	g Mn 100g <sup>-1</sup> sue-
g Mn 100g <sup>-1</sup> fitolito	0.864	0.493
g Mn en Fitolito 100g <sup>-1</sup> hoja	0.827	0.820

Las correlaciones significativas se señalan en negrita ( $p<0.10$ ), con un asterisco si ( $p<0.05$ ) y con dos asteriscos si éstas son muy significativa ( $p<0.01$ ).

## CONCENTRACIÓN DE Cu Y Zn

Se observa como a medida que aumenta la concentración de Al y Fe total en el suelo se incrementa también la concentración de Cu y Zn en los fitolitos, excepto en S5 (Tabla V.13 y Figura V.14 izqda.). En la misma figura a la derecha aparece representado el porcentaje de Cu y Zn inmovilizado en los fitolitos de *C. vulgaris* en cada uno de los suelos estudiados. El Cu al igual que el Al y el Fe, destaca por ser el elemento que en gran proporción es secuestrado en el fitolito, pero no en la misma manera en todos los suelos. Así, se encuentra que entre un 70 y un 92% del Cu total de la hoja se localiza en el fitolito para Q3, S5 y A2, mientras que para SO1 ese porcentaje solo alcanza el 14%. Los porcentajes de Zn en hoja dentro del fitolito en SO1 son los más bajos con un 6%, siendo intermedios para Q3 con un 33% y máximos en S5 y A2 con 52 y 59%, respectivamente.

En la Tabla V.14 pueden observarse los coeficientes de correlación de Pearson para los contenidos de Cu y Zn en fitolito, hoja y suelo. Así para Cu se encuentra una correlación significativa entre las concentraciones en fitolito y hoja ( $r=0.971$ ;  $p<0.05$ ). También es significativa ( $r=0.955$ ;  $p<0.05$ ) la correlación entre el contenido de Cu en fitolito referido a peso seco de hoja y la concentración total de Cu en el suelo. Para el Zn no se han encontrado correlaciones significativas entre las variables estudiadas.

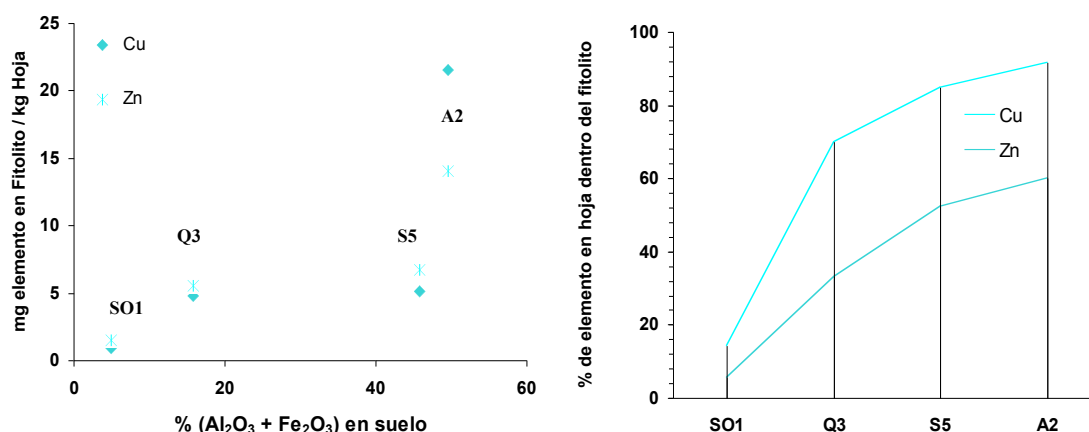


Figura V.13. A la izquierda en abscisas se representa el contenido total de Al y Fe del suelo expresado como óxido frente a la concentración de Al, Fe y Mn en el fitolito referida a peso seco de hoja. A la derecha se representa la proporción del elemento total de la hoja que esta en el fitolito para los suelos.

Tabla V.13. Concentraciones de Cu y Zn en fitolitos, hojas y suelos de *Calluna vulgaris*

	Cu Fitolito (mg/kg/hoja)	Cu Hoja (mg kg <sup>-1</sup> )	Cu Suelo (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn Fitolito (mg/kg/hoja)	Zn Hoja (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn Suelo (mg kg <sup>-1</sup> )
S5	5,168	6.1	13.8±1.3	6,725	12.9	72.3±0.7
A2	21,522	23.5	1083±53	14,088	23.5	212.2±4.8
Q3	4,821	6.9	5.2±0.1	5,594	16.8	15.0±0.7
SO1	0,920	6.4	10.7±1.1	1,500	26.7	122.0±2.8

S5= Gleysol en Melide ; A2= Tecnosol en Touro ; Q3= Podzol en Pico Sacro ; SO1=Histosol en Montouto.

Tabla V.14. Coeficientes de correlación de Pearson entre los contenidos en fitolito, hoja y suelo

	mg Cu kg <sup>-1</sup> hoja	mg Cu kg <sup>-1</sup> suelo
mg Cu kg <sup>-1</sup> fitolito	<b>0.971*</b>	0.000
mg Cu en Fitolito kg <sup>-1</sup> hoja	0.055	<b>0.977*</b>
	mg Zn kg <sup>-1</sup> hoja	mg Zn kg <sup>-1</sup> suelo
mg Zn kg <sup>-1</sup> fitolito	0.428	0.138
mg Zn en Fitolito kg <sup>-1</sup> hoja	0.055	0.610

Las correlaciones significativas para ( $p < 0.05$ ) se señalan en negrita con un asterisco.

#### CONCENTRACIÓN DE Ni, Cr Y Pb

Se observa que a medida que aumentan las concentraciones de Fe y Al totales en el suelo se incrementan también las concentraciones de Ni y Cr en los fitolitos, excepto en las muestras con las concentraciones más elevadas que son A2 y S5, ya que en S5 con menores contenidos de Fe y Al totales en el suelo presenta las concentraciones más elevadas de Cr y Ni en los fitolitos. Esto estaría relacionado con la riqueza en mineralizaciones de ambos metales que posee el suelo de serpentinitas. El incremento de Pb en el fitolito no aumenta con los contenidos de Fe y Al en los suelos (Tabla V.15 y Figura V.15 izqda.). En la misma figura a la derecha aparece representado el porcentaje de Ni, Cr y Pb inmovilizado en los fitolitos de *C. vulgaris* en cada uno de los suelos estudiados. Se encuentra que entre un 6% y un 8% del Ni de la hoja se localiza en el fitolito para SO1, Q3 y S5, mientras que este porcentaje se eleva a un 20 % en A2. Para el Cr el porcentaje es de un 5% en SO1, en torno a un 25% para Q3 y S5, alcanzando un 80% en A2. Para el Pb un 21% de este elemento en hoja está en el fitolito para SO1, un 27 para Q3, un 39% para S5 y se alcanza un 70% para A2.

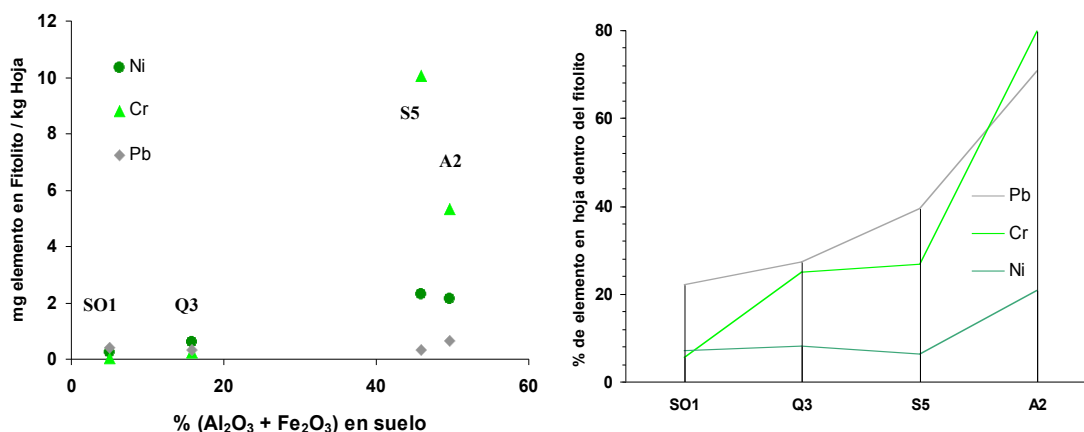


Figura V.15. A la izquierda en abscisas se representa el contenido total de Al y Fe del suelo expresado como óxido frente a la concentración de Al, Fe y Mn en el fitolito referida a peso seco de hoja. A la derecha se representa la proporción del elemento total de la hoja que esta en el fitolito para los distintos suelos.

Tabla V.15. Concentraciones de Ni, Cr y Pb en fitolitos, hojas y suelos de *Calluna vulgaris*

	Ni Fitolito (mg/kg hoja)	Ni Hoja (mg kg <sup>-1</sup> )	Ni Suelo (mg kg <sup>-1</sup> )	Cr Fitolito (mg/kg hoja)	Cr Hoja (mg kg <sup>-1</sup> )	Cr Suelo (mg kg <sup>-1</sup> )	Pb Fitolito (mg/kg hoja)	Pb Hoja (mg kg <sup>-1</sup> )	Pb Suelo (mg kg <sup>-1</sup> )
S5	2,313	37.6	1092±54	10,058	37.3	6028±88	0,314	0.8	9. 3±0.5
A2	2,132	10.3	62.4±2.5	5,334	6.7	576±33	0,635	0.9	10.7±0.3
Q3	0,626	7.8	4.1±0.1	0,249	1.0	25±3	0,325	1.2	9.7±1.2
SO1	0,231	3.3	10.6±2.9	0,054	1.0	23±2	0,417	1.9	42.4±3.3

S5= Gleysol en Melide ; A2= Tecnosol en Touro ; Q3= Podzol en Pico Sacro ; SO1=Histosol en Montouto.

En la Tabla V.16 pueden observarse los coeficientes de correlación de Pearson para los contenidos de Ni, Cr y Pb en fitolito, hoja y suelo. Así para Ni se encuentra una correlación muy significativa ( $p<0.01$ ) entre la concentración en el fitolito y el contenido total en hoja ( $r=0.986$ ) y significativa ( $p<0.05$ ) con el Ni total del suelo ( $r=0.964$ ).

Tabla V.16. Coeficientes de correlación de Pearson entre los contenidos en fitolito, hoja y suelo

	mg Ni kg <sup>-1</sup> hoja	mg Ni kg <sup>-1</sup> suelo
mg Ni kg <sup>-1</sup> fitolito	<b>0.986**</b>	<b>0.964*</b>
mg Ni en Fitolito kg <sup>-1</sup> hoja	0.763	0.662
	mg Cr kg <sup>-1</sup> hoja	mg Cr kg <sup>-1</sup> suelo
mg Cr kg <sup>-1</sup> fitolito	0.628	0.302
mg Cr en Fitolito kg <sup>-1</sup> hoja	0.158	<b>0.901</b>
	mg Pb kg <sup>-1</sup> hoja	mg Pb kg <sup>-1</sup> suelo
mg Pb kg <sup>-1</sup> fitolito	<b>0.998**</b>	<b>0.958*</b>
mg Pb en Fitolito kg <sup>-1</sup> hoja	0.110	0.000

Las correlaciones significativas se señalan en negrita ( $p<0.10$ ), con un asterisco si ( $p<0.05$ ) y con dos asteriscos si éstas son muy significativa ( $p<0.01$ )

Para Cr existe una correlación significativa ( $r=0.910$ ;  $p<0.10$ ) entre la concentración en el fitolito referido a peso seco de hoja y el contenido total en el suelo, aunque esta relación es logarítmica y no lineal con un coeficiente de relatividad ( $r^2$ ) de 0.9972.

Para el Pb la correlación es muy significativa ( $p<0.01$ ) entre la concentración en fitolito y el contenido total de hoja ( $r=0.998$ ) y significativa ( $p<0.05$ ) frente la concentración total de Pb en el suelo ( $r=0.958$ ).

#### FACTORES DE CONCENTRACIÓN FITOLITO – HOJA

Las concentraciones en los fitolitos siempre son mayores que las de la hoja, de manera que el fitolito actúa como un concentrador de los elementos químicos foliares. Si se divide la concentración en la hoja entre la concentración en el fitolito para cada suelo, se obtienen factores de concentración de al menos un orden de magnitud para la mayor parte de los elementos considerados. Así,



para Ca, Mg, K, Ni y Mn este factor es aproximadamente de 10, para Pb y Cr la concentración en fitolito es unas 30 veces mayor que en hoja, llegan a dos órdenes de magnitud para Al, Fe, Cu y Cr con concentraciones entre 30 y 100 veces mayores que en hoja. El Fe y el Al destacan por ser los elementos que en mayor proporción se concentran en los fitolitos en todos los brezales (con porcentajes entre 60 y 85%) y además, tienen los mismo factores de concentración en cada uno: 30 en A2, 50 en S5, 70 en Q3 y 120 en SO1.

#### RELACIÓN CON LA GEOQUÍMICA DE LOS BREZALES

Como se ha visto los fitolitos de *C. vulgaris* en la mina de Touro (A2) destacan por encontrarse en las mayores proporciones ( $2.54 \pm 0.25\%$ ), presentar las mayores concentraciones de Ca ( $3.50 \pm 0.25\%$ ), K ( $4.57 \pm 0.45\%$ ), Fe ( $1.93 \pm 0.04\%$ ) y Cu ( $847 \pm 38\%$ ) y las proporciones más elevadas para todos los elementos de secuestro en el fitolito frente al total de la hoja. Además, estos fitolitos destacan. Esto *a priori* podría relacionarse con la fuerte intemperización a la que ha estado sometido este suelo de mina, lo que ha hecho que se alteren los minerales primarios de la roca, poniéndose en disolución importantes concentraciones de elementos que estarían disponibles para su absorción por las plantas.

El suelo es un Tecnosol espólico (IUSS, WRB; 2007) situado sobre una antigua escombrera de la mina de Touro y la caracterización química de este suelo puede verse en la Tabla V.8. Se trata de un suelo esquelético de textura franco arenosa, bien drenado, potencial redox elevado (520 mv), reacción ácida (pH en agua de  $3.97 \pm 0.03$ ), acidez media del complejo de cambio (52% de saturación de Al), bajos niveles de cationes, P y materia orgánica y una relación C/N próxima a 14, propia de suelos distróficos con humus moderado o moderado mulliforme; así como elevados contenidos de metales pesados (Fe, Mn, Cu, Cr y Zn). Geológicamente se trata de un yacimiento caracterizado por la presencia de mineralizaciones masivas de pirita, pirrotina y calcopirita, incluidas como minerales accesorios en intrusiones de anfibolitas y anfibolitas granatíferas y que ha sido explotado a cielo abierto para la beneficiación del Cu entre los años 1974 y 1988. Este suelo constituye un ejemplo de un medio fuertemente contaminado por minería de sulfuros que está sometido desde el año 1996 a un proceso de recuperación ambiental, con aportes de distintos materiales encalantes y fertilizantes (Macías & Calvo de Anta, 2002); es decir, se trata de un suelo sulfato ácido en origen, lo que ha provocado la hidrólisis de los minerales primarios más lábiles, la desestabilización de los minerales de arcilla y un intenso proceso de meteorización que puso en disolución grandes cantidades de elementos: Si, cationes (Ca, Mg, K), Fe, Al y metales pesados (sobre todo Cu y Mn). Esta riqueza en elementos minerales constituye el medio ideal para que la planta pueda sintetizar los fitolitos. De hecho uno de los factores que condicionan la síntesis de fitolitos es precisamente una gran disponibilidad de Si (Raven, 1983; Hodson *et al.*; 2005).

Las proporciones de elementos inmovilizados en los fitolitos de las hojas de *C. vulgaris* de Touro son las más elevadas de los 4 brezales estudiados con: 30% para Ca, Mg y K, 20% para Ni, 60% para Zn, entre 70 y 80% para Al, Cr y Pb y un 90% para Fe y Cu.

Los fitolitos procedentes de serpentinitas (S5) ocupan el segundo lugar en cuanto a concentración elemental y sólo superan a los de la mina de Touro en las concentraciones de Mg, Cr y Ni (con  $1.84 \pm 0.14\%$ ,  $633 \pm 47\%$  y  $145 \pm 33\%$ , respectivamente), lo que es acorde con un suelo que por su mineralogía es hipermagnésico y con concentraciones muy elevadas de estos metales pesados. También ocupan el segundo lugar en cuanto a producción de fitolitos con un ( $1.59 \pm 0.07\%$ ).

El suelo se clasifica como un Gleysol mólico (IUSS, WRB; 2007), tiene textura franco arcillosa, bajo potencial redox (330 mv), reacción de tendencia neutra (pH en agua de  $5.79 \pm 0.01$ ), elevado contenido de Mg cambiante ( $3.67 \pm 0.12$ ), elevada saturación en cationes del complejo de cambio (98%), bajos niveles de nutrientes, P y materia orgánica; con una relación C/N próxima a 16, propia de materia orgánica tipo moder (Tabla V.8.). Destaca por sus elevados contenidos de metales pesados (Fe, Cr, Ni y Mn) lo que, unido a una mayor disponibilidad de Fe y Mn en forma divalente debido a las condiciones reductora constituye un buen ejemplo de un suelo con niveles elevados de metales pesados provenientes de la meteorización de los minerales primarios de la roca. La proporción de elemento en hoja dentro del fitolito es de un 15% para Ca, Mg, K y Mn, 30-40% para Pb y Cr, 50% para Zn, 60% para Ni y entre 75 y 85% para Al, Fe y Cu; reflejando de nuevo la geoquímica del medio.

Las producciones más bajas de fitolitos están en Q3 ( $0.92 \pm 0.43\%$ ) y en SO1 ( $0.60 \pm 0.08\%$ ) y, como corresponde con los suelos más oligotrofos, también los fitolitos resultan más pobres en elementos. En promedio los fitolitos de Q3 tienen concentraciones más elevadas que los de SO1 para todos los elementos (excepto para Al, Fe y Pb).

El suelo desarrollado sobre cuarcitas que se clasifica como un Podzol álbico (IUSS, WRB; 2007), con textura franco arenosa, buen drenaje, potencial redox de (450 mv) reacción ácida (pH en agua de  $4.25 \pm 0.03$ ), complejo de cambio saturado en Al (56%), bajos niveles de cationes y P. El contenido de materia orgánica es moderado y se encuentra poco evolucionada; la relación C/N de 21.6 indica que el N es un limitante para la actividad mineralizadora con la consiguiente acumulación de formas de C bruto (humus mor). Tiene una elevada concentración de Si y Al totales y baja concentración de Fe (que se refleja en la menor concentración de Fe en sus fitolitos) y bajos contenidos en metales totales. Al tratarse de un Podzol ha tenido lugar la liberación y eluviación de Si, Al y Fe en profundidad, lo que está en consonancia con las bajas concentraciones de estos elementos en los fitolitos. En cuanto a las proporciones de los elementos secuestrados en los fitolitos son del orden de 6-9 % para Ca, Mg, K, Mn y Ni, 25-35% para Cr, Zn y Pb, 60% para Al y 70% para Fe y Cu, valores menores que A2 y S5, pero mayores que SO1, excepto para Fe y Al.

El Histosol sáprico (IUSS, WRB; 2007) situado en una turbera minerotrófica tiene las producciones más bajas de los 4 brezales estudiados. Este valor es similar al encontrado por Carnelli *et al.* (2001) para *C. vulgaris* en brezales alpinos y subalpinos y que resulta ser 0.68%. La mayor parte de los elementos analizados en los fitolitos presentan las concentraciones más bajas para todos los brezales. Únicamente cabría destacar las mayores concentraciones de Al y Pb, este último hallazgo está en consonancia con los niveles de acumulación de Pb en los Histosoles del entorno (Martínez Cortizas, 1997; Pontevedra, 2002). Este suelo presenta condiciones reductoras (Eh de 250 mv),

fuerte acidez (pH en agua de  $4.05 \pm 0.06$ ), complejo de cambio saturado en bases (68%). Los contenidos y la disponibilidad de Si son bajos, así como los niveles de Al y Fe totales, con muy bajas concentraciones en metales pesados (excepto para Zn y Mn) (Tabla V.8.). Estos 2 últimos elementos son trazadores de las emisiones de la Central Térmica de As Pontes, localizada a unos 25 Km. al Oeste de esta turbera, detectándose el enriquecimiento en estos metales en otras turberas próximas (Martínez Cortizas, 1997). Los análisis de este epipedón corresponden a los 15 cm superficiales donde se registran las mayores concentraciones de Pb y que se corresponderían aproximadamente con los últimos 150 años de deposición de este elemento en la Península Ibérica (Martínez Cortizas, com. pers.), lo que incluye el periodo posterior a la Revolución Industrial y registra el uso de gasolinas con Pb. Las proporciones de elementos inmovilizados en los fitolitos son del orden de 2-3% para Ca, Mg y Mn, 6-8% para K, Ni y Zn, 20% para Pb y 72% para Al y Fe. Destacan por ser las más bajas en comparación con los otros brezales estudiados

El hecho de que concuerden la composición de los fitolitos (al margen de cómo se aborde su estudio) con la geoquímica del suelo y además, que los elementos que son inmovilizados en el fitolito en mayores proporciones sean tóxicos para la planta, confirmaría el papel de los fitolitos en el incremento de la resistencia frente al estrés metálico en *C. vulgaris*, actuando como sumidero de los elementos en exceso.



## CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

1. La producción de fitolitos sigue el mismo patrón de distribución que el de cenizas, siendo los órganos con mayores porcentajes de cenizas y fitolitos las hojas y las flores, en correspondencia con su mayor actividad metabólica. Los porcentajes más bajos se encuentran en tallos y raíces, con niveles muy similares entre sí, en concordancia con su función de sostén.
2. Se han encontrado diferencias en la producción de fitolitos según la especie y el tipo de suelo. Estos dos factores condicionan la cantidad y el órgano preferente de acumulación. *Calluna vulgaris* destaca por ser la especie que más fitolitos foliares produce en comparación con los otros brezos presentes en su mismo hábitat. Otras especies acumulan en mayor medida los fitolitos en la raíz (*Erica scoparia* y *Erica erigena*) y todas las especies que viven en suelos encharcados concentran mayoritariamente los fitolitos en este órgano (excepto *Calluna vulgaris*). Existen brezos (*Erica cinerea*, *Daboecia cantabrica* y *Erica umbellata*) en los que el órgano de mayor acumulación varía en función del suelo.
3. En la mina de Touro para todas las especies la producción media de fitolitos en todos los órganos es mayor, excepto en raíces, donde los valores más elevados están sobre serpentinitas. Los promedios más bajos se encuentran sobre cuarcitas y sedimentos orgánicos.
4. El análisis elemental de los fitolitos se ha abordado mediante fluorescencia de rayos X (técnica novedosa en este tipo de estudios) y que muestra resultados coherentes con los de microscopía electrónica de barrido. La elaboración de mapas de elementos ha permitido observar que éstos se distribuyen de forma homogénea en la superficie de los fitolitos, excepto para el Al, que a veces aparece concentrado preferentemente en determinadas zonas.
5. La composición química de los fitolitos foliares de *Calluna vulgaris* refleja la variedad de ambientes geoquímicos en los que vive la planta. Las concentraciones más elevadas se encuentran en la mina de Touro, excepto para Mg, Ni y Cr que se presentan en serpentinitas. Con valores intermedios están los fitolitos de suelos sobre cuarcitas y los más bajos en sedimentos orgánicos.
6. En todos los suelos el Al y el Fe son los elementos de la hoja que en mayor proporción son inmovilizados en los fitolitos con porcentajes superiores al 60%, alcanzando un máximo del 90% para el Fe en la mina de Touro. También destacan los elevados porcentajes del Cu y en menor medida de Cr, Pb y Zn, en función del suelo, de manera que a medida que aumentan los contenidos de metales en el suelo, estos incrementan su concentración en el fitolitos. Se encuentran correlaciones significativas entre las concentraciones en el fitolito y el contenido total en el suelo para el Ca, Mg, K, Fe, Cu, Ni, Cr y Pb; y entre el contenido en fitolito y hoja para Al, Cu, Ni y Pb.
7. El hecho de que los elementos que son inmovilizados en el fitolito en mayores proporciones puedan resultar tóxicos para la planta confirmaría la hipótesis inicial planteada en esta in-

vestigación sobre el papel de los fitolitos en el incremento a la resistencia frente al estrés metálico, actuando éstos como sumideros biogeoquímicos.

## CONCLUSIONS DU CHAPITRE PHYTOLITHES

1. L'abondance des phytolithes est directement corrélée à l'abondance des cendres. Les feuilles et les fleurs sont les organes qui possèdent le pourcentage le plus élevé de cendres et de phytolithes, en relation avec leur plus grande activité métabolique. Le pourcentage le plus faible de phytolithes est lié aux tiges et aux racines, leurs niveaux étant très proches les uns des autres, conformément à leur fonction de soutien.
2. Des différences ont été trouvées dans la production de phytolithes selon l'espèce et le type de sol. Ces deux facteurs conditionnent la productivité et l'organe préférentiel d'accumulation. *Calluna vulgaris* se distingue par le fait qu'il s'agit de l'espèce produisant le plus grand nombre de phytolithes foliaires, en comparaison aux autres bruyères présentes dans un même habitat. D'autres espèces accumulent proportionnellement plus de phytolithes dans leurs racines (*Erica scoparia* et *Erica erigena*), tandis que toutes les espèces vivant sur des sols inondés concentrent surtout les phytolithes dans les racines (à l'exception de la *Calluna vulgaris*). Il existe également des bruyères (*Erica cinerea*, *Daboecia cantabrica* et *Erica umbellata*) pour lesquelles l'organe de plus grande accumulation varie en fonction du sol.
3. Dans la mine de Touro, la production moyenne de phytolithes dans tous les organes est plus élevée pour toutes les espèces, sauf dans les racines, pour lesquelles les valeurs les plus élevées sont trouvées sur les serpentinites. Les moyennes les plus basses se rencontrent sur les quartzites et les sédiments organiques.
4. L'analyse élémentaire des phytolithes a été faite par la X fluorescence de rayons, une technique innovatrice dans ce type d'études. Les résultats démontrent qu'ils coïncident avec ceux du microscope électronique à balayage. Quant à l'élaboration de cartes d'éléments, elle a révélé que ceux-ci se distribuent de façon homogène à la surface des phytolithes, hormis pour l'Al qui apparaît parfois concentré préférentiellement dans certaines zones.
5. En ce qui concerne la composition chimique des phytolithes foliaires de *C. vulgaris*, elle reflète la variété de milieux géochimiques où vit la plante. Les concentrations les plus élevées se trouvent dans la mine de Touro, sauf pour Mg, Ni et Cr, qui sont liées aux serpentinites. Les phytolithes sur les quartzites ont des valeurs intermédiaires, alors que les plus faibles sont liées aux sédiments organiques.
6. Pour tous les types de sol, Al et Fe sont les éléments qui sont immobilisés dans la plus grande proportion dans les feuilles. Dans les phytolithes le pourcentage de Al et Fe peut dépasser 60% pour atteindre un maximum de 90% en ce qui concerne le Fe dans la mine de Touro. Il convient aussi d'observer le fort pourcentage de Cu et, dans une moindre mesure, de Cr, Pb et Zn, en fonction du sol, de telle sorte qu'au fur et à mesure qu'augmentent les contenus en métaux dans le sol, ceux-ci accroissent leur concentration dans le phytolithe. Les concentrations dans le phytolithe sont étroitement liées au contenu total dans le sol en

Ca, Mg, K, Fe, Cu, Ni, Cr et Pb ; le contenu en phytolithe dépend, quant à lui, de la feuille pour Al, Cu, Ni et Pb.

7. Le fait que les éléments étant immobilisés dans le phytolithe dans les plus grandes proportions puissent être toxiques pour la plante confirmerait l'hypothèse initiale de ce travail de recherche sur le rôle des phytolithes dans l'accroissement de sa résistance au stress métallique, ces derniers agissant comme des épurateurs biogéochimiques.





## **CONCLUSIONES GENERALES**



## CONCLUSIONES GENERALES

1. En este trabajo se han estudiado los factores de formación de suelo en los brezales, en un intento de caracterizar los hábitats de las doce especies de brezo presentes en Galicia. Los brezos muestran diferencias muy marcadas en lo que se refiere tanto a los tipos de hábitats que colonizan como a los principales factores edáficos que limitan su desarrollo (disponibilidad de agua, fertilidad del suelo, etc.).
2. Los hábitats que albergan las doce especies de brezos gallegos se han caracterizado sucesivamente por las condiciones de litología (fertilidad), reserva de agua edáfica, clima y profundidad del sustrato.
3. En Galicia se encuentran hábitats definidos por la existencia de suelos desarrollados sobre rocas básicas o ultrabásicas (*Erica vagans* y *E. erigena*.); hábitats que garantizan una reserva de agua edáfica constante (*E. scoparia*, *E. tetralix*, *E. mackaiana* y *E. ciliaris*); suelos poco profundos, sobre rocas ácidas o muy ácidas (*E. umbellata* y *Calluna vulgaris*); suelos profundos (*E. arborea* y *E. australis*); suelos someros o de profundidad media y sobre una amplia variedad de materiales de partida (*E. cinerea* y *Daboecia cantabrica*).
4. Las propiedades químicas de los suelos de brezal muestran una gran heterogeneidad en función del material de partida, habiéndose identificado los principales factores que subyacen a dicha variabilidad: reactividad del suelo, mineralogía, contenido de materia orgánica y química del Al.
5. La influencia del material de partida del suelo sobre las propiedades químicas de los suelos y sobre la composición elemental de los brezos ha resultado ser más importante que la influencia del factor especie. De hecho, las especies cuya distribución en Galicia se limita a tipos de suelos muy particulares (*E. vagans*, *E. scoparia*, *E. erigena*) o plantas más generalistas creciendo en determinadas litologías (*E. tetralix* en gabros) actúan como indicadores del ambiente geoquímico en el que viven.
6. Cabe destacar las elevadas correlaciones existentes entre los contenidos totales de N, P, Mg, Al, Fe, Mn, Cu, Ni y Cr en suelo y planta, y la relación más débil con los nutrientes en formas asimilables (P) o cambiables (Mg), lo que induce a pensar en la importante función que tienen las micorrizas ericoides en la transferencia de elementos desde el suelo hacia la planta.
7. Se han encontrado diferencias en la producción de fitolitos según el órgano vegetal, la especie y el tipo de suelo, de manera que estos dos últimos factores son los que condicionan la cantidad y el órgano preferente de acumulación.
8. El análisis elemental de los fitolitos se ha abordado mediante fluorescencia de rayos X (técnica innovadora en este tipo de estudios) y microscopía electrónica de barrido, estando en concordancia los resultados obtenidos de las dos técnicas utilizadas.

9. La composición química de los fitolitos foliares de *C. vulgaris* refleja la variedad de ambientes geoquímicos en los que vive la planta. Se han encontrado correlaciones significativas entre las concentraciones en el fitolito y el contenido total en el suelo para el Ca, Mg, K, Fe, Cu, Ni, Cr y Pb. En todos los suelos el Al y el Fe son los elementos de la hoja que en mayor proporción son inmovilizados en los fitolitos con porcentajes superiores al 60% y alcanzando el 90% para el Fe en la mina de Touro.
10. El hecho de que los elementos que son inmovilizados en el fitolito en mayores proporciones puedan resultar tóxicos para la planta, confirmaría el papel de los fitolitos como sumidero biogeoquímico, incrementando la resistencia frente al estrés metálico en *C. vulgaris*.

## CONCLUSIONES GENERALES

1. Dans ce travail on a étudié les facteurs de formation du sol sur la lande, pour essayer de caractériser les habitats des douze espèces de bruyères en Galice. Les bruyères révèlent des différences très marquées en ce qui concerne les types d'habitats qui colonisent le sol comme des facteurs majeurs qui limitent leur développement (disponibilité de l'eau, fertilité des sols, etc.).
2. Les habitats qui abritent des douze espèces de bruyères en Galice ont été caractérisés successivement par la lithologie (fertilité), les réserves en eau du sol, du climat et la profondeur du substrat.
3. En Galice les habitats sont définis par l'existence de sols développés sur roches basiques ou ultrabasiques (*Erica vagans* y *Erica erigena*.); Habitats qui assurent en permanence une réserve en eau du sol (*Erica scoparia*, *Erica tetralix*, *Erica mackaiana* y *Erica ciliaris* ), les sols peu profonds sur des roches acides ou très acides (*Erica umbellata* et *Calluna vulgaris*) sols profonds (*Erica arboorea* y *Erica australis*); ou sur des sols peu profonds ou de profondeur moyenne sur une grande variété de matériels du départ (*Erica cinerea* y *Daboecia cantabrica*).
- 4 Les propriétés chimiques des sols des landes montrent une grande hétérogénéité en termes de matériel de départ, après avoir identifié les principaux facteurs qui sous-tendent une telle variabilité: réactivité des sols, la minéralogie, la teneur en matière organique et la teneur d'Al
5. L'influence du matériau de départ du sol sur les propriétés chimiques du sol et la composition élémentaire de la bruyère s'est révélée plus importante que la différenciation spécifique. En fait, les espèces dont la distribution en Galice est limitée à des types de sols très particuliers (*Erica vagans*, *Erica scoparia*, *Erica erigena*) ou espèces plus communes qui se développent sur certaines lithologies (*Erica tetralix* sur gabbros) agissent comme des indicateurs de l'environnement géochimiste dans lequel ils vivent.
6. Il est intéressant de noter la forte corrélation entre la teneur totale de N, P, Mg, Al, Fe, Mn, Cu, Ni et Cr dans le sol et les plantes et la corrélation plus faible avec les éléments nutritifs sous formes assimilables (P) ou échangeables (Mg), ce qui suggère le rôle important que les mycorhizes ericoïdes ont dans le transfert d'éléments du sol à la plante.
7. La production de phytolithes varie selon l'organe végétal, l'espèce et le type de sol, de sorte que les deux derniers facteurs déterminent le taux d'accumulation dans les parties les plus productives.
8. L'analyse élémentaire de phytolithes a été faite en utilisant la X-fluorescence de rayons (une technique innovatrice dans ce type d'études) et la microscopie électronique à balayage sont concordants.
9. La composition chimique des feuilles de *Calluna vulgaris* reflète la variété des environnements géochimiques dans lesquels vit la plante. On a trouvé des corrélations significatives entre les concentrations totales des phytolithe et des sols pour le Ca, Mg, K, Fe, Cu, Ni, Cr, Pb. Dans tous les sols Al et Fe sont les éléments de la feuille dans une plus grande proportion son immobilisées sur phytolithes avec des pourcentages supérieurs à 60% et qui peuvent atteindre 90% pour Fe dans la mine de Touro.

10. Le fait que les éléments étant immobilisés dans le phytolithe dans les plus grandes proportions puissent être toxiques pour la plante confirmerait l'hypothèse initiale de ce travail de recherche sur le rôle des phytolithes dans l'accroissement de sa résistance au stress métallique, ces derniers agissant comme des épurateurs biogéochimiques en *Calluna vulgaris*.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS





- AGUIRRE, C.; CHÁVEZ, T.; GARCÍA, P. & RAYA, C. 2007. El silicio en los organismos vivos. *Interciencia*, 32 (8): 504-509.
- AIZPURU *et al.* 1999. Claves ilustradas de la flora del País Vasco y territorios limítrofes. Departamento de Agricultura y Pesca. Serv. Central Publ. Gob. Vasco.
- ALFÉREZ DELGADO, F., 1972. Importancia de los fitolitos en el estudio de los paleosuelos. *Coloquios de Paleontología*. 22: 5-6.
- ALONSO, I., 2004. La conservación de los brezales en Inglaterra. *Ecosistemas* 2004.1.
- ALLER, A.J., BERNAL, J.L. & DEL NOZAL, M.J., 1989. Geochemistry of trace elements. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Comunicaciones INIA-Tecnología Agraria, Madrid.
- ALLISON, M. & AUSDEN, M. 2004. Successful use of topsoil removal and soil amelioration to create heathland vegetation. *Biological Conservation*, 120(2): 221-228.
- ALLISON, M. & AUSDEN, M. 2006. Effects of removing the litter and humic layers on heathland establishment following plantation removal. *Biological Conservation*, 127(2): 177-182.
- ALLOWAY, B.J., 1995. Heavy Metals in Soils, 2<sup>nd</sup> edition. Blackie Academic and Professional, London. England.
- AMIGO, F. J., 1984. Estudio de los matorrales y bosques de la Sierra del Caurel (Lugo). Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- ARROYO, J. & HERRERA, J., 1988. Polinización y arquitectura floral en Ericaceae de Andalucía Occidental. *Lagascalia*, 15 (Extra): 615-623.
- ARROYO, J., 1988. Fenología de la floración en especies del matorral del Sur de España. *Lagascalia* 15 (Extra): 593-606.
- ARROYO, J., 1990. Ritmos climáticos y de floración en matorrales del SW de España. *Lagascalia* 16 (1): 25-50.
- AUBERT, H. & PINTA, M., 1977. Trace elements in soils. Elsevier, Amsterdam, p. 395.
- BAJWA R & READ D.J., 1985. The biology of mycorrhiza in the Ericaceae. IX Peptides as nitrogen sources for the ericoid endophytes and for mycorrhizal and non-mycorrhizal plants. *New Phytologist* 101: 459-467.
- BALBOA LÓPEZ, X. 1990. O monte en Galicia. Ed. Xerais. Vigo.
- BANNISTER, P., 1978. Flowering and shoot extension in heath plants of different geographical origin. *J. col.* 66: 117-131.
- BARTOLI, F. & SELMI, M., 1977. Sur l'évolution du silicium végétal en milieu pédogénétique aérés acides. *C. R. Acad. Sci. Ser. D.*, 284 : 279-282.
- BARTOLI, F. & WILDING, L.P., 1980. Dissolution of biogenic opal as a function of its physical and chemical properties. *Soil Science Society America Journal*, 44: 873- 878.
- BARTOLI, F., 1985. Crystallochemistry and surface properties of biogenic opal. *Journal of Soil Science*, 36: 335- 350.
- BARTOLOMÉ *et al.*, 2005. Los tipos de hábitat de interés comunitario de España. Guía básica. Ministerio de Medio Ambiente.

- BASANTA, M., DÍAZ VIZCAÍNO, E. CASAL, M. & MOREY, M., 1989. Diversity measurements in shrubland communities of Galicia (NW Spain), *Plant Ecology*, 82(2): 105-112.
- BATISTA, G.F., CAMPOS M.J.; DONIZETE, S.C. & MARCOS G.M., 2005. Resistance induction in wheat plants by silicon and aphids. *Sci. Agric.*, 62: 547-551.
- BAYER, E.; LÓPEZ GONZÁLEZ, G., 1989. Los brezos españoles. *Quercus*. 35: 21-36.
- BELTRAND, C. & BELTRAND, G., 1986. La végétation dans le géosystème phytogéographique des montagnes cantabriques centrales (Espagne). *Rev. Geogr. Pyr. S.O.*, 57 (3) : 291-312.
- BELTRAND, G., 1976. Pour une histoire écologique de la France rural. En: Histoire de la France rurale. Dir. Dudy, t.I, París, Le Seuil.
- BELLOT, F. & B. CASASECA, 1953. El *Quercetum suberis* en el límite Noroccidental de su área. *Anal. Inst. Bot. Cavanilles*, 11(1): 479-501.
- BELLOT, F., 1966. La vegetación de Galicia. Ed. CSIC.
- BENNETT P.C. & SIEGEL D.I., 1989. Silica-organic complexes and enhanced quartz dissolution in water by organic acids. Proceedings of the 6th international symposium on water-rock interaction, Water-Rock Interaction, Miles, Balkema, Rotterdam, 69-72.
- BENNETT P.C.; MELCER M.E.; SIEGEL D.I. & HASSETT J.P., 1988. The dissolution of quartz in dilute aqueous solutions of organic acids at 25°C. *Geochim. et Cosmochim Acta*, 52, p. 1521-1530.
- BERTOLDI DE POMAR, H., 1975. Los silicofitolitos: sinópsis de su conocimiento. *Darwiniana*, 19: 173-206.
- BIRCHALL, J. D., 1995. The essentiality of silicon in biology. *Chemical Society Reviews*, 24: 351-357.
- BLACKMAN, E., 1971. Opaline silica bodies in the range grasses of southern Alberta. *Canadian Journal of Botany*, 49: 769-781.
- BRADY P.V. & WALTER J.V., 1990. Kinetic of quartz dissolution at low temperature. *Chemical Geology*, 82: 253-264.
- BRINGEZU, K.; LICHTENBERGER, O.; LEOPOLD I. & NEUMANN D., 1999. Heavy metal tolerance of *Silene vulgaris*. *Journal of Plant Physiology*, 154: 536-546.
- BROWN, D. *et al.*, 1986. Reclamation and Vegetative Restoration of Problem Soil and Disturbed Lands. Noyes Acta Corporation.
- BUJÁN, E., 2006. Relaciones suelo-planta en brezales de *Erica andevalensis*. Establecimiento de las condiciones edáficas óptimas de desarrollo en suelos de minas de la Faja Pirítica andaluza. Tesis de licenciatura de Biología. Universidad de Santiago de Compostela. 82 p.
- BUJÁN, E.; SAIZ, J.L.; CEACERO, C.J. & MACÍAS, F., 2007. Relaciones suelo-planta en comunidades de *E. andevalensis* en suelos de mina de la Faja Pirítica andaluza. En: Tendencias Actuales de la Ciencia del Suelo. Nicolás Bellifante y Antonio Jordán, eds. Universidad de Sevilla, 938-946.
- BUOL, S.W. 1975. Soil Fertility Capability Classification. In, E. Bornemiza y A. Alvarado (Ed.). Soil Management in Tropical America. N. C. State. Univ. Raleigh, NC, 126-145.
- CAIN S.A., 1944. Foundations of plant geography. Harper & Brothers, New York.
- CALVO, R. & BUURMAN, P. 1987. Procesos de alteración de rocas serpentinizadas de Galicia. *Cuad. Lab. Xeolóxico de Laxe*, 11. 161-170.
- CALVO, R.; MACÍAS, F & RIVEIRO, A. 1992. Aptitud agronómica de los suelos de la provincia de La Coruña. Diputación Provincial de La Coruña. 88pp.
- CANALS, R.M. & SEBASTIÁ, M.Y., 2002. Heathland dynamics in biotically disturbed areas: on the role of some features enhancing heath success. *Acta Oecologica*, 23(5): 303-312
- CARNELLI, A.; MADELLA, M. & THEURILLAT, J.P. 2001. Biogenic silica production in selected alpine plant species and plant communities. *Annals of Botany* 87: 425-434.

- CARNELLI, A.; MADELLA, M.; THEURILLAT, J. P. & AMMANN, B., 2002: Aluminium in the opal silica reticule of phytoliths: a new tool in palaeoecological studies. *American Journal of Botany*, 89 (2): 346-351.
- CARNELLI, A.; THEURILLAB, J.P. & MADELLA, M., 2004. Phytolith types and type-frequencies in subalpine-alpine plant species of the European Alps *Review of Palaeobotany and Palynology*, 129: 39– 65.
- CASAL JIMÉNEZ, M., BASANTA ALVES, M. & GARCÍA NOVO, F., 1984. La regeneración de los montes incendiados en Galicia. Monografía. Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico. Universidad de Santiago de Compostela.
- CASASECA, B., 1959. La vegetación y flora del término municipal de Santiago de Compostela. *Bol. Univ. Compostelana*, n° 6: 297-349.
- CASASECA, B., 1960. Estudio de la vegetación y flora del término municipal de Santiago de Compostela. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- CASTILLO RODRÍGUEZ, F., 2001. El clima de las áreas de turbera de Galicia. En: Turberas de montaña de Galicia. Martínez Cortizas y García-Rodeja Gayoso (coord.). Col. Técnica Medio Ambiente. Xunta de Galicia.
- CASTROVIEJO, S., 1972. Flora y cartografía de la vegetación de la Península de Morrazo (Pontevedra). Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- CASTROVIEJO, S., 1973. El área suroccidental de los brezales gallegos. *Anal. Inst. Bot. Cavanilles*, 30: 197-213.
- CASTROVIEJO, S., 1977. Estudio sobre la vegetación de la Sierra del Invernadeiro (Orense). Instituto para la Conservación de la Naturaleza. Ministerio de Agricultura.
- CASTROVIEJO, S., 1992. El fuego, factor natural en el monte gallego. Guía de la naturaleza de Galicia, 47. Faro de Vigo.
- CEBALLOS, L., 1945. Los matorrales españoles y su significación. Discurso leído en el Acto de Recepción en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- CEBRIÁN (DE), B., 1948. Brezales y brezos. Síntesis geobotánica de las formaciones Ericoideas y resumen monográfico de las especies españolas. Instituto forestal de investigaciones y experiencias. Ministerio de Agricultura. Año XIX. Núm. 39. Madrid.
- COCKER K.M.; EVANS, D.E. & HODSON, M.J., 1998. The amelioration of aluminium toxicity by silicon in wheat (*Triticum aestivum* L.): malate exudation as evidence for an in plant mechanism. *Planta*, 204: 318-323.
- COSTA TENORIO, M., MORLA JUARISTA, C. & SAINZ OLLERO, H., 1992. Datos sobre las comunidades de caméfitos espinosos en los macizos meridionales galaicos (NW España). *Lazaroa*, 13:139-147.
- CHEBURKIN, A.K. & SHOTYK, W., 1996. An energy dispersive miniprobe multielement analyzer (EMMA) for direct analysis of Pb and other trace elements in peat. *Fresenius, J. Anal. Chem.*, 345: 688-691.
- CHEN, C & LEWIN, J., 1969. Silicon as a nutrient element for *Equisetum arvense*. *Canadian Journal of Botany*, 47(1): 125-131.
- CHEVALIER, A., 1923. L'Origine Géographique et les migrations des Bruyères. *Bulletin de la Societée Botanique de France*, 70: 855-870.
- CHUNG, J-B. & ZAZOSKI, R.J., 1994. Ammonium-potasium and ammonium-calcium exchange equilibria in bulk in rhizosphere soil. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 58: 1368-1371.

- DALDA GONZÁLEZ, J., 1972. Vegetación de la cuenca del río Deo (cuenca alta del Mandeo): estudio ecológico-fitosociológico y florístico. Monografía de la USC. Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico de la Universidad de Santiago de Compostela.
- DE LA FUENTE GARCÍA, V. & MORLA, C., 1985. Datos sobre los encinares de la comarca de Trives (Orense, España). *Lazaroa*, 8:241-249.
- DELMAS A.B.; GARCIA-HERNANDEZ J.E. & PEDRO G., 1982. Discussion sur les conditions et les mécanismes de la formation du quartz à 25° C en milieu ouvert. Analyse réactionnelle par voie cinétique. *Sci. Geol., Bull.*, Strasbourg, 35: 81-91.
- DEVEZE, M., 1965. Histoires des Forêts. P.U.F. Col. Que sais je? 1135. Paris.
- DÍAZ VIZCAÍNO, E. 1985. Ecología del matorral de la cuenca del Tambre (La Coruña). Relación con factores ambientales. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- DÍAZ VIZCAÍNO, E., 2005. Matorrales de Galicia: tojales y brezales. Conservación y gestión. En: *Novas Tendencias na caracterización e xestión da biodiversidade*. IBADER, 2: 103-108.
- DÍAZ VIZCAÍNO, E., BASANTA, M. & MOREY, M., 1989. Preferencias ecológicas y óptimos ecológicos de diferentes comunidades de matorral y de sus especies en Galicia (NW España). *Studia Oecologica*, VI: 41-67.
- DOCAMPO ÁLVAREZ, M.P., 1972. Ecología del brezal con tojo. Tesis de Licenciatura. Universidad de Santiago de Compostela.
- DOVE P.M. & RIMSTIDT J.D., 1994. Silica-water interactions. in: Silica. Physical behavior, geochemistry and materials applications, P.J. Heaney, C.T. Prewitt, G.V. Gibbs, (eds.), *Rev. Miner.*, 29, *Min. Soc. Amer.*, 259-308.
- DOVE P.M., 1995. Kinetic and thermodynamic controls on silica reactivity in weathering environments. in: Weathering kinetics of silica minerals, S.A. Brantley, A.F. White, (eds.), *Min. Soc. Amer.*, 235-290.
- ECHLIN, P., 1998. Low-voltage Energy-Dispersive X-ray Microanalysis of Bulk Biological Material. *Microscopy and Microanalysis*, 4: 577-584.
- ENDREDY (DE) A.S., 1963. Estimation of free iron oxides in soils and clays by a photolytic method. *Clay Miner. Bull.*, 24(5): 209-217.
- EPSTEIN E., 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 91: 11-17.
- EPSTEIN E., 1999. Silicon. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 50: 641-664.
- EYRE, S.R., 1968. Vegetation and soils. A world picture. Edward Arnold Publishers Ltd.
- FAUTEUX, F.; Rémus-Borel, W. ; Menzies, J.G. ; Bélanger, R.R. 2005. Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi. *FEMS Microbiol. Lett.*, 249: 1-6.
- FERNÁNDEZ PRIETO, J.A., GUITIÁN RIVERA, J. & AMIGO VÁZQUEZ, J., 1987. Datos sobre la vegetación subalpina de los Ancares. *Lazaroa*, 7:259-271.
- FIELDES, M & PERROT, K.W., 1966. The nature of the allophone in soils. III. Rapid field and laboratory test for allophone. *New Zeland Journal of Science*, 9:623-629.
- FINK, S., 1991. Unusual patterns in the distribution of calcium oxalate in spruce needles and their possible relationships to the impacts of pollutants. *New Phytologist*, 119: 41-315.
- FINLEY, D.S., 1999. Patterns of calcium oxalate crystals in young tropical leaves: a possible role in anti-herbivory defense. *Revista de Biología Tropical*, 47(1): 35-40.

- FONTÁN, L.E. & TAPIA DEL RÍO, L.E., 2003. Revisión del estatus de la avifauna en el LIC "Serra do Xistral". En: Actas do V Congreso Galego de Ornitoloxía (S. González, Coord.), pag.7-19. Sociedade Galega de Historia Natural. Santiago de Compostela.
- FRAGA VILA, I., SAHUQUILLO BALBUENA, E. & GARCÍA TASENDE, M., 2001. Vegetación característica de las turberas de Galicia. En: Turberas de montaña de Galicia. Xunta de Galicia.
- FRAGA VILA, M.I., 1982. Aportación al estudio taxonómico de las especies de los géneros *Erica* y *Calluna* presentes en Galicia. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- FRESCO, L.F.M., 1982. An analysis of species response curves and of competition from field data: Some results from heath vegetation. *Plant Ecology*, 48(2): 175-185.
- GARCÍA MARTÍNEZ, X.R., 1991. Guía das plantas con flores de Galicia. Edicións Xerais de Galicia. Vigo
- GARCIA HERNANDEZ J.E., 1981. Interpretation cinétique de la géochimie d'altération de la silice à basse température (25°C). INRA, Versailles, 213 p.
- GARRELS R.M. & CHRIST C.L., 1965. Solutions, Minerals and Equilibria. Harper et Row, New-York, 450 p.
- GILBERT. O.L. & ANDERSON, P., 1998. Habitat creation and repair. Oxford University Press.
- GILLMAN, G.P. & SUMPTER, E.A., 1985. KCl-extractable aluminium in highly weathered soils. It is exchangeable? *Soil Science and Plant Analysis*, 16: 561-568.
- GIMÉNEZ DE AZCÁRATE CORNIDE, J. & AMIGO VÁZQUEZ, J., 1996. Inventario da flora vascular dos aflo-ramientos calios de Galicia (Pteridophyta e Spermatophyta). *Cadernos da Área de Ciencias Biolóxicas (Inventarios). Seminario de Estudos Galegos*, Vol., XII. Ed. do Castro. O Castro-Sada. A Coruña.
- GIMÉNEZ DE AZCÁRATE CORNIDE, J., ROMERO BUJÁN, M.I. & AMIGO VÁZQUEZ, J., 1996. Los espinales de la Pruno-Rubion ulmifolii en Galicia. *Lazaroa*, 16:89-104.
- GIMINGHAM, C.H., 1969. The interpretation of avriation in north-European dwarf-shurb heath communi-ties. *Plant Ecology*, 17(1): 89-108.
- GIMINGHAM, C.H., 1981. Conservation: European Heathlands. En: R.L. Specht (Ed.) Heatlands and Re-lated Shrublands. *Analytical Studies*, 249-259. Elsevier Scientific Publishing Company. Amster-dam.
- GIMINGHAM, C.H., CHAPMAN, S.B. & WEBB, N.R., 1979. European Heathlands. En: R.L. Specht (Ed.). Heathlands and Related Shrublands. Descriptive Studies, 361-413. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam.
- GÓMEZ ORELLANA, L. RAMIL -REGO, P. & MUÑOZ SOBRINO, C., 1997. Una nueva secuencia polínica y cronológica para el depósito pleistoceno de Mougás (NW de la Península Ibérica). *Revue de Pa-léobiologie*, 17(1):35-47.
- GONZÁLEZ HERNÁNDEZ, M.P., SILVA PANDO, F.J., MOSQUERA LOSADA, R. & RIGUEIRO RODRÍGUEZ, A., 2002. Contenido mineral de especies componentes del monte gallego (NW España). Importancia en la gestión de ecosistemas pascícolas. En Actas de la XV Reunión Científica de la Sociedad Española de Estudio de los Pastos, pp 659-664.
- GREGER, M. & LANDBERG, T., 1999. Use of willow in Phytoextraction. *International Journal of Phyto-remediation*, vol 1: 2, 115-123.
- GUITIÁN RIVERA, L., 1993. Sistemas de utilización del espacio y evaluación del paisaje vegetal en las Sierras Orientales de Lugo. La evolución del paisaje en las Montañas del entorno de los Caminos Jacobeos. Pérez Alberti, A; Guitián Rivera, L; Ramil Rego, P (eds.) Xunta de Galicia.

- GUITIÁN RIVERA, L., 2001. La destrucción histórica del bosque en Galicia. *SEMATA, Ciencias Sociais e Humanidades*, 13: 105-166.
- GUITIÁN RIVERA, L., 2001. O papel do monte na construción das paisaxes em Galicia. En: O Feito Diferencial Galego. As Paisaxes de Galicia, 2: 49-59. As Paisaxes de Galicia, celebrado na sé do Museo do Pobo Galego en Santiago de Compostela os días 26-29 de xuño de 2000]. Augusto Pérez Alberti (coord.) Museo do Pobo Galego, D.L. Santiago de Compostela.
- GUITIÁN, F. & CARBALLAS, T., 1976. Técnicas de Análisis de Suelos. Pico Sacro. Santiago de Compostela.
- GUITIÁN, J., RODRÍGUEZ OUBIÑA J. & SÁNCHEZ FERNÁNDEZ, J.M., 1990. Estudio fenológico de la floración en las brañas del Noroeste de la Península Ibérica. *Anales Jardín Botánico de Madrid*, 47 (2): 401-409.
- GUNES, A., INAL A., BAGCI E.G. & PILBEAM D.J., 2007. Silicon-mediated changes of some physiological and enzymatic parameters symptomatic for oxidative stress in spinach and tomato grown in sodic- $\beta$  toxic soil. *Plant Soil*, 290: 103-114.
- HASELWANDTER K., 1997. Soil micro-organisms, mycorrhiza and restoration ecology. In: Urbanska KM, Webb NR, Edwards PJ (eds), *Restoration Ecology and Sustainable Development*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 65–80.
- HERRERA, J., 1986. Flowering and fruting phenology in the coastal shrublands of Doñana, south Spain. *Vegetation* 68: 91-98.
- HERRERA, J., 1987. Biología reproductiva de algunas especies del matorral de Doñana *Anales Jardín Botánico Madrid*, 44(2):483-497
- HERRERA, J., 1988. Datos sobre biología florar en la flora de Andalucía Oriental. *Lagascalia* 15 (Extra): 607-614.
- HODSON, M.J. & EVANS, D.E., 1995. Aluminium-silicon interactions in higher plants. *J. Exp. Bot.*, 46: 161-171.
- HODSON, M.J. & SANGER, A.G., 1999. Aluminium/silicon interactions in conifers. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 76: 89–98.
- HODSON, M.J. & SANGER, A.G., 2002. Silicon and abiotic stress. Second Silicon in Agriculture Conference. August 2002. Tsuruoka, Japan.
- HODSON, M.J., SANGER, A.G. & LING, L.E.C. 2009. Biomineralisation/environment interactions in conifers: Illustrated by hemlock, *Tsuga canadensis* (L.). *Quaternary International*, 193: 3–10.
- HODSON, M.J., WHITE P.J.; MEAD A. & BROADLEY M.R. 2005. Phylogenetic variation in the silicon composition in plants. *Ann. Bot.*, 96: 1027-1046.
- HODSON, M.J.; WILLIAMS, M.J. & SANGSTER, A.G., 1997. Silica deposition in the needles of the Gymnosperms. I. Chemical analysis and Light Microscopy. In: Pinilla, A., Juan-Tresserras, J., Machado, M. (Eds.), *The State-of-the-Art of Phytoliths in Soils and Plants*. Monograph 4, Centro de Ciencias Medioambientales. Madrid, Spain, pp. 123–133.
- HONAINÉ, M.F.; ZUCOL, A.F. & OSTERRIETH, M.L. 2005. Biomineralizaciones de sílice en *Celtis tala* (Celtidaceae). *Bol. Soc. Argent. Bot.*, 40 (3-4): 229 - 239.
- HORST, W.J.; SCHMOL N.; KOLLMEIER M.; BALUSKA F. & SIVAGURU M., 1999. Does aluminium affect root growth of maize through interaction with the cell wall - plasma membrane - cytoskeleton continuum? *Plant and Soil*, 215: 163-174.
- IGME, 1982. Mapa Geológico de España (E 1:200.000). Hojas nº 1. La Coruña, nº 2 Santiago de Compostela y nº 3 Lugo. Servicio del Ministerio de Industria y Energía.

- IUSS, WRB 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos nº103. FAO. Roma.
- IZCO, J., 1987. Galicia, pp. 385-418 en: La vegetación de España. Serv. Publicac. Univ. Alcalá de Henares. Colección Aula Abierta, nº 3.
- IZCO, J. 2001. La flora y la vegetación. En Atlas de Galicia. volumen 1: El Medio Natural. Xunta de Galicia.
- IZCO, J. & AMIGO, J., 2002. Formaciones fruticasas de Galicia: Matogueiras e arbustados. En Rigueiro, A. (coord.). Botánica III. Galicia Natureza. Hércules Ediciones. A Coruña.
- IZCO, J., AMIGO, J. & GARCÍA-SAN LEÓN, D., 1999. Análisis y clasificación de la vegetación leñosa de Galicia (España). *Lazaroa*, 20: 29-47.
- IZCO, J., AMIGO, J. & GARCÍA-SAN LEÓN, D., 2000. Análisis y clasificación de la vegetación leñosa de Galicia (España), II. La vegetación herbácea. *Lazaroa*, 21: 25-50.
- IZCO, J.; AMIGO, J.; RAMIL-REGO, P.; DÍAZ, R. & SÁNDHEZ J.M., 2006. Brezales: biodiversidad, usos y conservación. *Recursos Naturais*, 2:5-24.
- JATO RODRÍGUEZ, M.V. & RODRÍGUEZ GRACIA, V., 1986. Introducción ao estudo da flora e á vexetación de Galicia. A flora e vexetación no pasado. En: O medio natural galego. *Cadernos do Seminario de Sargadelos* (Edicións do Castro), 47: 109-118.
- JONES, H.E. & ETHERINGTON J. R., 1970. Waterlogging: I. The survival of *Erica cinerea* L. and *E. tetralix* L. and its apparent relationship to iron and manganese uptake in waterlogged soil. *The Journal of Ecology*, Vol. 58, No. 2., pp. 487-496.
- JONES, J.B. & SEGNET, R., 1969. Water in Sphere-type opal. *Mineralogical Magazine*, 37: 357-361.
- JULIVERT, M., FONTBOTE, J.M., RIBEIRO A. & CONDE, L., 1972. Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares. Inst. Geol. Min. España.
- KERLEY S.J., 1993. The role of mycorrhizal fungi in the mineralization of nitrogen from organic compounds with special reference to aseptically produced natural substrates. Ph.D thesis, Department of Animal and Plant Sciences, University of Sheffield.
- KILLICK D.J.B., 1979. African Mountain heathlands. En: R.L. Specht (ed.) *Ecosystems of the world: heathlands and related shrublands*. Elsevier. Amsterdam. 96-116.
- KRASKO, A.; LORENZ, B.; BATEL, R.; SCHRODER, H.C.; MÜLLER, I.M. & MÜLLER, W.E., 2000. Expression of silicatein and collagen genes in the marine sponge *Suberites domuncula* controlled by silicate and myotrophin. *Eur. J. Biochem.* 267: 4878-4887.
- LAL, R. et al., 1992. Soil Restoration. *Advances in Soil Science*, Vol. 17.
- LAWSON, C. S., FORD, M.A., MITCHLEY, J. & WARREN, J.M., 2004. The establishment of heathland vegetation on ex-arable land: the response of *Calluna vulgaris* to soil acidification. *Biological Conservation*, 116(3): 409-416.
- LEAKE J.R. & READ D.J., 1990. Chitin as a nitrogen source for mycorrhizal fungi. *Mycological Research*, 94: 993-995.
- LEGG, C. 1995. Heathland dynamics: A matter of scale. En: D.B.A. Thompson, A.J. Hester & M.B. Usher (Eds.). *East and Moorland: Cultural Landscapes*, 3: 117-134.
- LIN, C. & COLEMAN, N.T., 1960. The measurement of exchangeable aluminium in soils and clays. *Soil Science Society of American Proceedings*, 24: 2207-2220.

- LOACH, K., 1966. Relations between Soil Nutrients and Vegetation in Wet-Heaths: I. Soil Nutrient Content and Moisture Conditions. *The Journal of Ecology*, Vol. 54, 3: 597-608.
- LOACH, K., 1968. Relations Between Soil Nutrients and Vegetation in Wet-Heaths: II. Nutrient Uptake by the Major Species in the Field and in Controlled Conditions. *The Journal of Ecology*, Vol. 56, No. 1. (Mar., , pp. 117-127.
- LOGAN, J. & TRAINA, S.J., 1993. Trace metals in agricultural soils. En: *Metals in groundwater*. Lewis Publishers. USA.
- LÓPEZ ANDIÓN, J. M., 2001. Transformacións nas actividades e na paisaxe agraria. O Feito Diferencial Galego. As Paisaxes de Galicia., 2: 29-48. As Paisaxes de Galicia. Celebrado na Sé do Museo do Pobo Galego en Santiago de Compostela os días 26-29 de xuño de 2000]. Augusto Pérez Alberti (coord.) Museo do Pobo Galego, D.L. Santiago de Compostela.
- LÓPEZ GARCÍA, M.J., J.M. ARCE, J. FERNÁNDEZ TOMÁS & MONTESERÍN, V., 1978. Mapa Geológico de España. E 1:50.000. Hoja número 24. Mondoñedo. Servicio de Publicaciones. Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Industria.
- MAA J.F.; MITANI N.; NAGAO S.; KONISHI S.; TAMAI K.; IWASHITA T. & YANO M., 2004. Characterization of the silicon uptake system and molecular mapping of the silicon transporter gene in rice. *Plant Physiol.*, 136: 3284-3289.
- MAA J. F. & TAKAHASHI, E., 2002. Si content of vascular plants. *Soil, Fertilizer and Plant Silicon*. 205-233.
- MACÍAS, F & CALVO DE ANTA, R., 2002. Proyecto de Recuperación de los Ríos Brandelos, Pucheiras, Felisa, Portapego, Rego das Rozas y Lañas en el entorno de las Minas de Touro. Instituto de Investigaciones Tecnológicas. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Biología. Universidad de Santiago.
- MACÍAS, F & CALVO, R., 1983. El análisis del medio físico y su aplicación a la ordenación del territorio: Una experiencia piloto en el área de Padrón (La Coruña). *Trab. Compost. Biol.*, 10: 179-208.
- MACÍAS, F & CALVO, R., 2009. Niveles genéricos de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de Galicia. Xunta de Galicia.
- MACÍAS, F. & CALVO DE ANTA, R., 2001. Los suelos. Atlas de Galicia. Xunta de Galicia.
- MADELLA, M., 2007. Phytoliths: a terrestrial botanical dataset for paleoenvironmental reconstructions. *Geophysical Research Abstracts*, vol. 9.
- MAREY, M.F.; CRECENTE, R. & RODRÍGUEZ, V., 2004. Claves para comprender los usos del monte en Galicia (España) en el siglo XX. II Simposio Iberoamericano de Gestión y Economía Forestal. Organizado por Centre Tecnologic Forestal de Catalunya (CTFC). Barcelona.
- MARRS, R. H., 1985. Techniques for reducing soil fertility for nature conservation purposes: A review in relation to research at Roper's Heath, Suffolk, England. *Biological Conservation*, 34(4): 307-332.
- MARRS, R.H. & BANNISTER, P., 1978. The adaptation of *Calluna vulgaris* (L.) Hull to contrasting soil types. *New Phytol.*, 81:753-761.
- MARRS, R.H. & PROCTOR, J, 1978. Chemical and Ecological Studies of Heath Plants and Soils of the Lizard Peninsula, Cornwall *Journal of Ecology*, Vol. 66, No. 2 (Jul., 1978), pp. 417-432 Published by: British Ecological Society.
- MARTÍNEZ CATALÁN, J.R., 1981. Estratigrafía y estructura del Domo de Lugo (Sector Oeste de la Zona Asturoccidental-Leonesa). Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca.
- MARTÍNEZ CATALÁN, J.R., 1985. Estratigrafía y estructura del domo de Lugo (Sector Oeste de la zona Asturoccidental-leonesa). *Corpus Geologicum Gallaeciae*, 2ª Serie, 2, 1-291.



- MARTÍNEZ CORTIZAS, A., & PÉREZ ALBERTI, A., 1999. Atlas climático de Galicia. A. Martínez Cortizas y A. Pérez Alberti (coords.). Xunta de Galicia.
- MARTÍNEZ CORTIZAS, A., 2001. Las turberas: terminología, tipos y clasificaciones. *Turberas de montaña de Galicia*. A. Martínez Cortizas y E. García-Rodeja Gayoso (coords.). Xunta de Galicia.
- MARTÍNEZ CORTIZAS, A., CASTILLO RODRÍGUEZ, F., PÉREZ ALBERTI, A. & FERNÁNDEZ DE ANA MAGÁN, F., 1999. Balance hídrico. En: Atlas climático de Galicia. A. Martínez Cortizas y A. Pérez Alberti (coords.). Xunta de Galicia.
- MARTÍNEZ CORTIZAS, A.; PONTEVEDRA POMBAL, X.; NÓVOA MUÑOZ, J.C. & GARCÍA-RODEJA E., 1997. Four thousand years of atmospheric Pb, Cd and Zn deposition recorder by the ombrotrophic peat bog of Penido Vello (Northwestern Spain). *Water Air Soil Pollut.* 100, 387-403.
- MARTÍN-JÉZÉQUEL, V.; HILDEBRAND, M. & BRZEZINSKI, M.A., 2000. Silicon metabolism in diatoms: implications for growth. *J. Phycol.*, 36: 821-840.
- MASUNAGA, T.; KUBOTA, D.; HOTTA, M & WAKATSUKI, T., 1998. Mineral Composition of leaves and Barks in Aluminium Accumulators in a Tropical Rain Forest in Indonesia Soil Sci. *Plant Nutr.*, 44: 347, 358.
- MATO IGLESIAS, M. C., 1963. Estudio de la vegetación del Partido Judicial de Caldas de Reyes, Tesis de Licenciatura. Universidad de Santiago.
- MATTIGO S.V. & KITTRICK J.A., 1980. Temperature and water activity as variables in soil mineral activity diagrams. *Soil Sc. Soc. Am.*, 44: 149-154.
- MCGUIRE, A.F.; KRON, A., 2005. Phylogenetic relationships of European and African Ericas. *Int. J. Plant Sci.* 166 (2):311-318.
- MELSTED, S.W., 1973. Soil plant relationships. Some practical considerations in water management. En: Proc. Join Confer. Recycling municipal sludge and effluents in land. Univ. Illinois.
- MÉNDEZ, M. & KARLSSON, P. S., 2005. Nutrient stoichiometry in *Pinguicula vulgaris*: Nutrient availability, plant size and reproductive status. *Ecology*, 86(4) 982-991.
- MITCHELL DT, READ DJ, 1981. Utilization of inorganic and organic phosphates by the mycorrhizal endophytes of *Vaccinium macrocarpon* and *Rhododendron ponticum*. *Transactions of the British Mycological Society* 76: 225-260.
- MITCHELL, D.T. & GIBSON, B.R. 2006. Ericoid mycorrhizal association: ability to adapt to a broad range of habitats. *Mycologist*, 20: 2 - 9.
- MITCHELL, R. J., AULD, M.H.D., HUGHES, J.M. & MARRS, R.H., 2000. Estimates of nutrient removal during heathland restoration on successional sites in Dorset, southern England. *Biological Conservation*, 95(3): 233-246.
- MORIKAWA, C. K. & SAIGUSA, M., 2004. Mineral composition and accumulation of silicon in tissues of blueberry (*Vaccinium corymbosus* cv. Bluecrop) cuttings. *Plant and Soil*, 258: 1-8.
- MUÑOZ ESPASADÍN, A. 2008. Estructura y dinámica de comunidades de *Erica ciliaris* y *Erica tetralix* en el marco de la gestión sostenible. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- MUÑOZ TABOADELA, M. & GUITIÁN OJEA, F. 1962. La necesidad de cal en los suelos de cultivo gallegos. *An. Edaf. Agrob.*, 21, 473-480.
- NEUMANN D.; ZUR NIEDEN, U.; LEOPOLD I. & LICHTENBERG, O., 1997. Heavy metal tolerance of *Minuartia verna*. *Journal of Plant Physiology*, 151: 101-108.
- NIELSEN, K. E., LADEKARL, U.L. & NORNBERG, P., 1999. Dynamic soil processes on heathland due to changes in vegetation to oak and Sitka spruce. *Forest Ecology and Management*, 114(1): 107-116.
- ODUM *et al.*, 1988. Ecosistemas y políticas públicas. Universidad de Florida. Disponible en <http://www.unicamp.br/fea/ortega/eco/esp/index.htm>.
- ODUM, E. P., 1979. Ecología. Ed. Interamericana.

- OJEDA, F., ARROYO, J. & MARAÑÓN, T., 1998. The phytogeography of European and Mediterranean heath species (Ericoideae, Ericaceae): a quantitative analysis. *Journal of Biogeography*, 25: 165-178.
- OLIVER E.G.H., 1991. Ericoideae (Ericaceae): A review. *Contrib. Bolus Herb.*, 13: 158-208.
- OLSEN, S.R. & WATANABE, F.S., 1965. Test of an Ascorbic Acid Method for determining Phosphorus in Water and NaHCO<sub>3</sub> Extracts from Soil. *Soil Science Society Proceedings*, 677-678.
- ORTIZ, S., 1986. Series de vegetación y su zonación altitudinal en el macizo de pena Trevinca y Serra do Eixo. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- ORTIZ, S., AMIGO, J. & IZCO, J., 1991. Las orlas forestales fruticasas orensano-sanabrienses: dos nuevas asociaciones del Valle del Sil. *Lazaroa*, 12:303-315.
- OSORO, K. *et al.*, 1998. Livestock production systems and the vegetation dynamics of less favoured areas (LAFs): developing viable systems to manage seminatural vegetation in temperate LAFs in Spain. 2° LSIRD Conference on Livestock Production in the European LFAS, Bray, Ireland.
- PAIS, I. & BENTON JR., 2000. The Handbook of Trace Elements. St. Lucie Press. Florida.
- PARGA PONDAL, I., 1960. Observación, interpretación y problemas geológicos de Galicia. Not. Coms. Inst. Geol. Min. Esp., 59 :33-358.
- PARGA PONDAL, I., 1966. Datos Geológico-petrográficos de la provincia de La Coruña. En: Estudio agrobiológico de la provincia de La Coruña. Inst. Inv. Geológicas, Edafológicas y Artes Gráficas de Faro de Vigo, S.A., Vigo.
- PARGA PONDAL, I., 1967. Carte geologique du Nord-ouest de la Péninsule Iberique. Serv. Goel. Portugal, 1ª ed. España.
- PARGA PONDAL, I. & ALEIXANDRE, T., 1966. La arenisca ortocuarcítica del Gistral (Lugo). Inst. Geol. y Min. de España.
- PARR, J. F.; LENTFER, C. J. & BOYD, W.E., 2001. A Comparative Analysis of Wet and Dry Ashing Techniques for the Extraction of Phytoliths from Plant Material. *Journal of Archaeological Science*, 28, 875–886.
- PARRY, J. 2003. Heathland. Living Landscapes. The National Trust. London.
- PEARSALL, D., 1988. Interpreting the meaning of macroremain abundance: the impact of source and context. En Ch. A. Hastorf y V. S. Popper (eds.): Current paleoethnobotany. Analytical methods and cultural interpretations of archaeological plant remains. Prehistoric Archeology and Ecology Series. University of Chicago Press, 97-118.
- PEECH, M.; ALEXANDER, L.T.; DEAN, L.A. & REED, J.F., 1947. Methods of Soil Analysis for Soil Fertility Investigations. U.S. Dep. Agr. Cir.
- PEITEADO VARELA, E. ; PIÑEIRO REBOLO, R. & MARTÍNEZ CORTIZAS, A. 2002. Distribución de algunos elementos mayores (K, Ca, Ti, Fe) y traza (Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Br) en dos suelos policíclicos pod-sólicos. *Edafología*, 9 (1), 61-84.
- PIPERNO, D. R., 1988. Phytolith analysis: an archaeological and geological perspective. San Diego: Academic Press.
- PIPERNO, D.R. & BECKER, P., 1996. Vegetational history of a site in the central Amazon Basin derived from phytolith and charcoal records from natural soils. *Quaternary Research. San Diego*, 45, 202-209.
- PIPERNO, D.R., 2006. Phytoliths. A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists. Lanham MD, Altamira Press, 238pp.
- PONTEVEDRA POMBAL, X., 2002. Turberas de montaña de Galicia. Génesis, propiedades y su aplicación como registros ambientales geoquímicos. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.

- PORTELA SILVA, E., 1975. La región del Obispado de Tuy en los siglos XII a XV. *Compostellanum*, vol. XX. Santiago de Compostela.
- PUENTE GARCÍA, E., PENAS MERINO, A. & LÓPEZ PACHECO, M.J., 1987. Los brezales medio y altimontanos de los subsectores Laciano y Ancarense. *Lazaroa*, 7: 197-205.
- PUTWAIN, P.D. & GILHAM D.A., 1990. The significance of the dormant viable seed bank in the restoration of heathlands. *Biological Conservation*, 70:169-181.
- PYWELL, R. F., WEBB, N.R. & PUTWAIN, P.D., 1994. Soil fertility and its implications for the restoration of heathland on farmland in Southern Britain. *Biological Conservation*, 70 (2): 169-181.
- PYWELL, R.F., PAKEMAN, R.J., ALLCHIN, E.A. , BOURN, N.A.D. , WARMAN, E.A & WALKER, K.J., 2002. The potential for lowland heath regeneration following plantation removal. *Biological Conservation*, 108:247-258.
- RAMIL REGO, P. & AIRA RODRÍGUEZ, M.J., 1992. Contribución al conocimiento de la vegetación Tardiglacial y Holocena en el extremo norte de la Terra Chá (Galicia, España). *Nova Acta Científica Compostelana* (Biología), 3:49-58.
- RAMIL REGO, P., MUÑOZ SOBRINO, C., GÓMEZ ORELLANA, L. & FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, C. 2001. Historia ecológica de Galicia: modificaciones del paisaje a lo largo del Cenozoico. *SEMATA, Ciencias Sociais e Humanidades*, 13: 67-103.
- RAMIL, P.; RODRÍGUEZ GUTIÁN, M. A.; RUBINOS, M.; FERREIRO DA COSTA, J.; HINOJO, B.; BLANCO, J. M.; SINDE, M.; GÓMEZ ORELLANA, L.; DÍAZ VARELA, R. & MARTÍNEZ SÁNCHEZ, S., 2005. La expresión territorial de la biodiversidad. Paisajes y Hábitats. Recursos Rurais. Cursos y Monografías, 2, 109- 128. Ibader- USC.
- RASTIN, N., 1991. Beziehung zwischen ökologischen Artengruppen und bodenchemischen Verhältnissen in Hamburger Waldbestaänden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 155, 169–174.
- RAVEN, J. A., 1983. The transport and function of silicon in plants. *Biol. Reviews* 58: 179-207.
- READ D.J., 1983. The biology of mycorrhiza in the Ericales. *Canadian Journal of Botany* 61: 985–1004.
- READ D.J., 1996. The structure and function of the ericoid mycorrhizal root. *Annals of Botany* 77: 365–374.
- REGUEIRO RODRÍGUEZ, A. & SILVA PANDO, F.J. 1984. Aportaciones a la flora de Galicia, I. *Anal. Jard. Bot. Madrid*, 40(2): 385-395.
- RETUERTO, R. & CARBALLEIRA, A. 1990. Phytoecological importance, mutual redundancy and phylogenetic threshold values of certain climatic factors. *Plant Ecology*, 90(1): 47-62.
- RETUERTO, R. & CARBALLEIRA, A. 1992. Use of direct gradient analysis to study the climate-vegetation relationships in Galicia, Spain. *Plant Ecology*, 101(2): 183-194.
- RETUERTO, R. & CARBALLEIRA, A. 2004. Estimating plant responses to climate by direct gradient analysis and geographic distribution analysis. *Plant Ecology*, 170(2): 185–202.
- REYES, O. & CASAL, M. 2008. Regeneration models plant regenerative types related to the intensity of fire in Atlantic shrubland and woodland species. *Journal of Vegetation Science*, 19: 575-583.
- REYES, O.; BASANTA, M.; CASAL, M. & DÍAZ VIZCAÍNO, E. 2000. Functioning and dynamics of Woody plant ecosystems in Galicia (NW Spain). En: L. Trabaud (Ed.). *Life and Environment in the Mediterranean*, 1-41. Wit Press Southampton, Boston.
- RIVAS MARTÍNEZ, S., 1979. Brezales y jarales de Europa occidental (Revisión fitosociológica de las clases *Calluno-Ulicetalia* y *Cisto-Lavanduletea*). *Lazaroa*, 1. Madrid.

- RIVAS-MARTÍNEZ, S., 1987. Introducción: Nociones sobre fitosociología, biogeografía y bioclimatología, pp 17-45 En: La vegetación de España. Serv. Public. Univ. Alcalá de Henares. Colección Aula Abierta, nº 3.
- RODRÍGUEZ - OUBIÑA, J. & ORTIZ, S., 1991. Los pastizales pioneros vivaces de los suelos serpentínicos del NO ibérico. *Lazaroa*, 12:333-344.
- RODRÍGUEZ - OUBIÑA, J., 1982. Brañas en Galicia Meridional. Ecología, flora y vegetación. Tesis de Licenciatura. Univ. Santiago de Compostela.
- RODRÍGUEZ - OUBIÑA, J., 1987. Estudio fitosociológico de las brañas de la provincia de A Coruña. Tesis Doctoral. Fac. Farmacia. Univ. Santiago de Compostela.
- RODRÍGUEZ - OUBIÑA, J., SOÑORA, F.X. & ORTIZ, S., 1997. Estudio fitosociológico das queiroeiras de *Erica erigena* R. Ross da Serra da Capelada (Galicia, NO da Península Ibérica). *Nova Acta Científica Compostelana (Biología)*, 7: 97-101.
- ROEM, W. J. & BERENDSE, F. 2000. Soil acidity and nutrient supply ratio as possible factors determining changes in plant species diversity in grassland and heathland communities. *Soil Science*, 92(2): 151-161.
- ROL, R., MERVEILLEUX DU VIGNAUX, F. & TOULGOUAT, P., 1968. Flore des arbres, arbustes et arbrisseaux. Ed.: La Maison Rustique. Paris.
- ROMERO, M. I., 1993. La vegetación del valle del Río Cabe (Terra de Lemos, Lugo). Tesis de Licenciatura. Universidad de Santiago de Compostela.
- ROMERO-ARANDA M.; JURADO O. & CUARTERO J., 2006. Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *J. Plant Physiol.*, 163: 847-855.
- ROSE, R.J. & WEBB, N.R., 1994. The effects of temporally ballast roadways on heathland vegetation. *Journal of Applied Ecology*, 31: 642-650.
- S.G.H.N. Sociedade Galega de Historia Natural, 1995. Atlas de vertebrados de Galicia. Consello da Cultura Galega, Santiago de Compostela.
- SANGSTER, A.G.; WILLIAMS, M.J. & HODSON, M.J., 1997. Silica deposition in the needles of the Gymnosperms. II. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. In: Pinilla, A., Juan-Tresserras, J., Machado, M. (Eds.), *The State-of-the-Art of Phytoliths in Soils and Plants*. Monograph 4, Centro de Ciencias Medioambientales. Madrid, Spain, pp. 135-146.
- SAUERBECK, D., 1985. "Funktionen, Güte and Belastbarkeit des Bodens aus agrarkulturchemischer Sicht". Kohlhammer Verlag, Stuttgart.
- SCHMITT J.M., HUET-TAILLANTER S. & THIRY M., 2002. La friche industrielle de Mortagne-du-Nord (59) - II - Altération oxydante des scories, hydrochimie, modélisation géochimique, essais de lixiviation et proposition de rémédiation. *Bull. Soc. géol. France*, 173/4: 383-393.
- SIFFERT B., 1967. Some reactions of silica in solution: formation of clay. Translation of: Mémoires du Service de la Carte géologique d'Alsace et de Lorraine, nº21, Published for the U.S. Department of Agriculture and the National Science Foundation, Washington, D.C.
- SILVA PANDO, F.J., 1989. Aproximación al esquema fitosociológico de Galicia. En: Sobre flora y vegetación de Galicia. Consellería de Agricultura. Xunta de Galicia.
- SILVA-PANDO, F.J. & REGUEIRO, A., 1992. Guía das árbores e bosques de Galicia. Ed. Galaxia, D.L. Vigo.
- SILVA-PANDO, F.J., 1990. La flora y vegetación de la sierra de Ancares. Base para la planificación y ordenación forestal. Universidad Complutense. Madrid.

- SILVA-PANDO, F.J., GONZÁLEZ, M.P.H., DÍAZ-MAROTO, I.H. & ROZADOS, M.J.L., 1993. Caracterización ecológica de las comunidades arbóreas del N.O. peninsular. En: Proceedings of the First Spanish Forest Congress, Lourizán, Pontevedra, vol. I, pp. 441–446.
- SOÑORA, X., 1995. Estudio das matagueiras da área coruñesa do subsector Galaico-asturiano septentrional. Memoria de Licenciatura. Fac. Biología. Univ. Santiago de Compostela.
- STRAKER C.J., 1996. Ericoid mycorrhiza: ecological and host specificity. *Mycorrhiza* 6: 215–225.
- STRIBLEY D.P. & READ D.J., 1974. The biology of mycorrhiza in the Ericaceae. IV. The effect of mycorrhizal infection on uptake of  $^{15}\text{N}$  from labeled soil by *Vaccinium macrocarpon* Ait. *New Phytologist* 73: 1149–1155.
- SYMES, N.C. & DAY, J., 2003. A practical guide to the restoration and mangement of lowland heathland. The RSPB, Sandy.
- TABOADA, T. & GARCÍA PAZ, C. 1997. Evolución geoquímica durante la meteorización y edafogénesis de rocas graníticas de Galicia. *Edafología*, 3: 57-64.
- TERRADAS, J., 2001. Ecología de la vegetación. De la ecofisiología de las plantas a la dinámica de comunidades y paisajes. Ed. Omega, S.A. Barcelona
- THIRY M., HUET-TAILLANTER S. & SCHMITT, J.M. 2002. La friche industrielle de Mortagne-du-Nord (59) - I – Prospection du site, composition des scories, hydrochimie, hydrologie et estimation des flux. *Bull. Soc. Géol. France*, 173/4: 369-381.
- THIRY, M.; FORETTE, N. & SCHMITT, J.M., 1983. Techniques de diffraction des rayons X et interprétation des diagrammes.- Note technique, Ecole des Mines de Paris, Centre de Géologie Générale et Minière.
- TUCKER, G.M. & EVANS, M.I., 1997. Habitats for birds in Europe a conservation strategy for the wider environment. Cambridge UK: Birdlife International (Birdlife Conservation Series nº6).
- TURNER, J. & KELLY, J., 1981. Relationships between soil nutrients and vegetation in a north coast forest. *Aust. For. Res.* 11, 201–208.
- TWISS, P.C.; SUESS, E. & SMITH R.M. 1969. Morphological classification of grass phytoliths. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33: 109-115.
- VALDÉS, C.M. & GIL SÁNCHEZ, L., 2001. Tercer Inventario Forestal Nacional. La transformación histórica del paisaje forestal en Galicia. Ministerio de Medio Ambiente.
- VAN ZUUREN, A. 1969. Structutral petrology of an area near Santiago de Compostela (NW Spain). *Leidse. Geol. Med.*, 45:1-17.
- VERA, M.L., 1990. Efecto de la altitud en la fenología de la floración en especies arbustivas del Norte de España. *Lagascalía*, 18(1): 3-14.
- WEBB, N.R. 1998. The traditional management of European heathlands. *Journal of Applied Ecology*, 35: 987-990.
- WEDEPOHL, K.H., 1990. Handbook of geochemistry, II-4/42. Springer-Verlag. Berlín.
- WEISS, D., SHOTYK, W. & CHEBURKIN, A., 1998. Determination of Pb in ashed peat plants using an energy-dispersive miniprobe multi-element analyzer (EMMA). *Analyst*, 123: 2097-2102.
- WILDING, L. P. & DREES, L.R., 1971. Biogenic op al in Ohio soils. *Soil Sci. Soc. America Proc.* 35: 1004-1010.
- XUNTA DE GALICIA, 1991. La minería de Galicia. Consellería de Industria e Comercio.

- XUNTA DE GALICIA. 2000. Consellería de Medio ambiente. Propuesta de Red Natura. Santiago.
- XUNTA DE GALICIA. Dirección Xeral de Montes e Medio Ambiente Natural. 2001. O monte galego en cifras. Xunta de Galicia. Santiago de Compostela.
- YARIV, S. & CROSS, H., 1979. Geochemistry of colloid Systems for Earth scientist. *Colloid geochemistry of silica*, 6: 247-285.
- ZAS, R. & ALONSO, M., 2002. Understory vegetation as indicators of soil characteristics in northwest Spain. *Forest Ecology and Management*, 171(1-2):101-111.
- ZUCOL, A.F. 2001. Fitólitos. 3. Una nueva metodología descriptiva. Asociaciones fitolíticas de *Piptochaetium montevidense* (Poaceae). *Boletín de las Sociedad Argentina de Botánica*, 36: 69 - 85.
- ZURRO, D., 2006. El análisis de fitólitos y su papel en el estudio del consumo de recursos vegetales en la prehistoria: Bases para una propuesta metodológica materialista. *Trabajos de Prehistoria*, 63 (2): 35-54.



